



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus-ja maaehitusinstituut

Andres Liiv

**REOVEESETTE AUNKOMPOSTIMINE TALVISTES
OLUDES**

WINDROW COMPOSTING OF SLUDGE IN WINTER CONDITIONS

Magistritöö
Vesiehitus ja veekaitse õppekava

Juhendaja: Professor Mait Kriipsalu PhD

Tartu 2019

| | | | |
|--|---------------|-----------------------------------|------------|
| Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014 | | Magistritöö lühikokkuvõte | |
| Autor: Andres Liiv | | Õppekava: Vesiehitus ja veekaitse | |
| Pealkiri: Reoveesette aunkompostimine talvistes oludes | | | |
| Lehekülgi: 70 | Jooniseid: 28 | Tabeleid: 9 | Lisasid: 1 |
| Osakond / Õppetool: Maaehituse ja veemajanduse õppetool ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: T220, T270 Juhendaja(d): Mait Kriipsalu, PhD Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2019 | | | |
| <p>Eesti reoveepuhastites on üheks peamiseks probleemiks reoveesette kompostimine just talvistes oludes, kuna madal temperatuur pidurdab protsesse kompostimisel või ei lase sellel üldse toimuda. Seetõttu on levinud praktika, et talvistes tingimustes sete lihtsalt kogutakse platsidele ning kompostimisega jätkatakse alles kevadel kui sete ja aunad on üles sulanud. See toob aga kaasa asjaolu, et kompostimiseks sobilik aeg on lühem ning nõuab sellevõrra ka suuremaid platse, kompost haiseb, ei stabiliseeru ning kõik see seab kahtluse all settekomposti tootena sertifitseerimise.</p> <p>Käesoleva töö eesmärgiks oli uurida, kas ja millistes tingimustes on võimalik talvistes oludes reoveesetet aunkompostida. Ühtlasi püüti välja selgitada, kas välitingimustes kompostitud sete stabiliseerubmääruse nr 78 nõuetele kohaselt ning kas valimisse võetud neljas reoveepuhastis valitsevad olud on kooskõlas määruse nr 24 nõuetega.</p> <p>Käesoleva töö jaoks koguti andmed suvise ja talvise katse käigus. Tulemustest selgub, et aunkompostimine on talvistes oludes võimalik, kui kasutada sobilikku tugimaterjali ning optimeerida protsess. Suvise katse käigus semperatuur tõusis ning stabiilsus saavutati, kuid talvise katse käigus temperatuur ei tüusnud piisavalt ja stabiilsust ei saavutatud. Mõlemaga jõuti siiski piirväärtuse ligidale, mis tähendab, et kõigis puhastites tuleb sertifitseerimise edendamiseks teha tööd, millest osa on tehnilist, osa organisatoorset laadi.</p> | | | |
| Märksõnad: Reoveesete, aunkompostimine, stabiilsus, talvised olud | | | |

| | | | |
|---|-------------|--|---------------|
| Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014 | | Abstract of Master's Thesis | |
| Author: Andres Liiv | | Curriculum: Hydraulic Engineering and Water Pollution Control | |
| Title: Windrow composting of sludge in winter conditions | | | |
| Pages: 70 | Figures: 28 | Tables: 9 | Appendixes: 1 |
| Department / Chair: Chair of Rural Building and Water Management Field of research (CERC S) code: T220, T270 Supervisors: Mait Kriipsalu, PhD Place and date: Tartu 2019 | | | |
| <p>One of the main problems in Estonian wastewater treatment plants is composting of sewage sludge especially in winter conditions, because the low temperature slows down the process in composting or makes it impossible to take place at all. Therefore, it is common practice in winter conditions that sewage sludge is simply collected in the fields and composting continues in the spring when the sludge and windrows are melted. This leads to the fact that the time for composting is shorter and as a result, larger fields are required, the compost stinks and does not stabilize, this calls into question about the certification of the sediment compost as a product. The aim of this master's thesis was to investigate whether and in which conditions it is possible to windrow compost of the sludge in winter conditions. Also author of the work tried to find out whether the composted sediment in the outdoor conditions will stabilize in accordance with the requirements of regulations No. 78 and whether the conditions of the sampled four wastewater treatment plants were in accordance with the requirements of regulation No. 24. Data for the thesis was collected during the experiment in the summer and winter. The results show that windrow composting is possible in winter conditions by using suitable support material and optimizing the process. High temperature and stability was achieved during the experiment in the summer, not in the winter. Both parameters, however, were close to limit value which shows d that in all wastewater treatment plants both technical and organizational kind of work is needed to promote certification.</p> | | | |
| Keywords: Sewage sludge, windrow composting, stability, winter condition | | | |

SISUKORD

| | |
|--|----|
| SISSEJUHATUS | 6 |
| 1. REOVEESETTE KÄITLEMINE..... | 8 |
| 1.1. Reoveesette käitlemine Eesti maakondades..... | 8 |
| 1.2. Reoveesette käitlustehnoloogiad..... | 13 |
| 1.3. Kompostimine..... | 16 |
| 1.3.1. Lähte- ja tugiained | 16 |
| 1.3.2. Niiskus, poorsus, hapnikusisaldus | 18 |
| 1.3.3. Süsiniku ja lämmastiku suhe | 19 |
| 1.3.4. Temperatuur..... | 20 |
| 1.3.5. pH | 22 |
| 1.3.6. Kompostiauna suurus | 22 |
| 1.4. Aunkompostimistehnoloogia | 23 |
| 1.5. Kompostimine külmal ajal..... | 25 |
| 1.6. Nõuded reoveesette käitlemiseks..... | 27 |
| 2. MATERJAL JA METOODIKA..... | 32 |
| 2.1. Katsepaik | 32 |
| 2.2. Katse ülesehitus | 32 |
| 2.3. Mõõteriistad | 36 |
| 2.4. Mõõtmisrežiim ja proovivõtt | 38 |
| 2.5. Küsitlus reoveepuhastites | 41 |
| 3. TULEMUSED JA ARUTELU | 43 |
| 3.1. Esimene kompostimiskatse..... | 43 |
| 3.1.1. Temperatuur..... | 43 |
| 3.1.2. Lagugaasid..... | 47 |

| | |
|---|----|
| 3.1.3. Stabiilsus..... | 49 |
| 3.2. Teine kompostimiskatse | 51 |
| 3.2.1. Temperatuur..... | 51 |
| 3.2.2. Lagugaasid..... | 55 |
| 3.2.3. Stabiilsus..... | 56 |
| 3.3. Kompostimistehnoloogia ülevaade reoveepuhastites ja sertifitseerimisvalmidus | 56 |
| KOKKUVÕTE | 59 |
| SUMMARY | 62 |
| KASUTATUD KIRJANDUS | 65 |
| LISAD | 69 |
| Lisa. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta | 70 |

SISSEJUHATUS

Kõigis reoveepuhastites tekib paratamatult reoveesetet ning seda tuleb ühel või teisel moel käidelda. Nõuetekohaselt käideldud sete lihtsustab selle edasist kasutamist, avardades selle võimalikke kasutusvaldkondasid. Eestis reguleerib reoveesette käitlemist kaks määrust: Keskkonnaministri määrused nr 78 „Reoveesette põllumajanduses, haljastuses ja rekultiveerimisel kasutamise nõuded“ ja nr 24 „Reoveesetest toote valmistamise nõuded“. Kuigi detailides on määrused erinevad, siis sette töötlemise mõistes on mõlema määrase peamine sisu sarnane – töödeldud sete peab olema kindlasti stabiliseeritud ning hügieeniliseks muudetud.

Eestis on reoveesette stabiliseerimisel enamlevinud kompostimine [2]. Reoveesette kompostimiseks tuleb sette hulka lisada tugiainet, et siduda liigne vesi ning muuta sete koredaks, et parandada aunades õhu liikumist. Kompostimise käigus tõuseb temperatuur, mis on mikroorganismide elutegevuse indikaator. Kompostimist mõjutavad aga mitmed tegurid ning üheks tähtsaimaks võib pidada ilmastiku mõju – sademeid ning talvist pikka külmaperioodi. Ehkki Eesti puhastites käideldakse reoveesetet veidi erinevalt, on puhasti operaatorite sõnul kõikjal üheks probleemiks välitingimustes kompostimine just talvistes oludes. Ilmaoludel on suur mõju, kuna madal temperatuur pidurdab protsesse kompostimisel või ei lase sellel üldse toimuda. Seetõttu on levinud praktika, et talvistes tingimustes sete lihtsalt kogutakse platsidele ning kompostimisega jätkatakse alles kevadel kui sete ja aunad on üles sulanud. See toob aga kaasa asjaolu, et kompostimiseks sobilik aeg on lühem ning nõuab sellevõrra ka suuremaid platse. Lisaks on mitmed operaatorid täheldanud, et kõige suurem haisuprobleem tekibki just kevadel, kui alustatakse terve talve (anaeroobsetes tingimustes) seisnud sette kompostimisega. Sete on aja jooksul läinud vanaks ning kompost ei lähe käima.

Kui reoveesetet saaks kompostida aasta ringi, oleks hüpoteetiliselt võimalik tagada efektiivsem platside kasutus ning teisalt leevendada ka kevadisi haisuprobleeme. Käesoleva töö eesmärgiks oli uurida, kas ja millistes tingimustes on Eestis võimalik talvistes oludes reoveesetet aunkompostida. Ühtlasi püüti välja selgitada, kas settekompost vastab määruses nr 78 „Reoveesette põllumajanduses, haljastuses ja rekultiveerimisel kasutamise nõuded“ välja toodud nõuetele komposti stabiilsuse saavutamise kohta. Samuti uuriti, kas valimisse

võetud neljas reoveepuhastis valitsevad olud on kooskõlas määrusega nr 24 „Reoveesetest toote valmistamise nõuded“. Magistritöö käigus tehti kaks kompostimiskatset, suvine ja talvine, ning kõigis uuritavates puhastites vaadati üle kasutusel olev kompostimistehnoloogia ja inspekteeriti kompostimisrajatisi ning viidi läbi küsitlus.

Magistritöö fookuse all on sette kompostimisprotsess ja selle optimeerimisega seotud parameetrid. Seetõttu ei analüüsita ega hinnata näiteks raskmetallide sisaldusi, kuna neid ei ole võimalik sette tavapärase töötlemisega oluliselt mõjutada.

Käesolev magistritöö koosneb neljast peatükist. Esimeses peatükis antakse ülevaade reoveesete käitlemisest. Teine ja kolmas peatükk sisaldab magistritöö empiirilist osa. Teises peatükis toob autor välja uuringu metoodika ning kolmandas peatükis toob välja katse tulemused. Neljas peatükk on kokkuvõte. Selles peatükis antakse ka soovitused edaspidiseks reoveesete käitlemiseks. Empiirilise osa jaoks on andmed kogutud kahe erineva välikatse raames. Küsitluse tulemused on koondatud eraldi köidetud lisadesse.

Magistritöö tulemused on kasulikud kõikidele vee-ettevõtetele, kes tegelevad reoveesete kompostimisega.

Töö autor tänab kõiki, kes on aidanud kaasa käesoleva magistritöö valmimisele. Suur tänu Kaja Orupõllule katse käigus võetud proovide analüüsimise eest, Ingrid Tustile, Morten Poolakesele, kes ehitas valmis reaalajas töötava automaatse temperatuurimõõtmisüsteemi, Vallo Lemmiksoole, Elva reoveepuhasti personalile, Elva linna kompostiplatsi hooldajatele ja Tõnu Jõesaarele aunade termopiltide eest. Samuti soovib autor tänada ka Emajõe Veevärki, Paide, Võru ja Kohtla-Järve puhasteid küsitluses osalemise eest ning KIK projekti Rakendusuuring vee-ettevõtetes aunkompostimistehnoloogia optimeerimiseks reoveesete jäätimestaatusel lakkamiseks (leping nr T180062MIMV).

1. REOVEESETTE KÄITLEMINE

1.1. Reoveesette käitlemine Eesti maakondades

Reoveesete on reovee puhastamisel vältimatu kõrvalsaadus, mida tekib Eestis hinnanguliselt 158 900 t/a (kuivaine sisaldus keskmiselt 15%) [1]. Kõige enam tekib reoveesetet Harju-, Ida- ja Lääne-Virumaal (vastavalt 95, 86 ja 87 m³/d), kõige vähem Hiiu, Lääne ning Saare maakonnas (vastavalt 9, 3 ja 4 m³/d) [2]. Kõige suuremad reoveesette käitlejad on Eesti suuremate linnade ja asulate reoveepuhastid [3], ehkki mahu poolest suurim reoveesette töötleja on hoopis Kundas asuv AS Estonian Cell, mille haavapuitmassi tehase reoveepuhastusjaamas puhastatakse $2\,090 \times 10^3 \text{ m}^3$ reovett aastas [4]. Maakondade kaupa võib suurimaid reoveepuhasteid iseloomustada järgnevalt.

Harju maakonna suurim reoveepuhasti on AS-le Tallinna Vesi kuuluv Paljassaare reoveepuhastusjaam, kus sete stabiliseeritakse anaeroobselt metaantankides, seejärel tahendatakse ning peale seda järelkompostitakse lahtistes aunades kompostimisväljakutel. Tugiaineks on freesturvas [5]. Kokku tekib päevas reoveesetet kuivaines 22 650 kg [6]. Aastas saadakse Harju maakonnas 37 557 tonni settekomposti [2]. Valmiskomposti kasutatakse 99% ulatuses haljastuses [6].

Hiiu maakonna suurim reoveepuhasti on Kärkla reoveepuhasti, mida haldab AS Kärkla Veevärk. Ülejäänud reoveepuhastite reostuskoormused jäävad alla 2 000 inimekvivalendi. Ettevõtte toob kogu maakonna väiksematest reoveepuhastitest sette Kärkla reoveepuhastisse, kus tihendatud sete stabiliseeritakse spetsiaalsetel settetahendusväljakutel. Sete stabiliseerub seal viie aasta jooksul [6], kuid protsessi ei saa kutsuda kompostimiseks. Tahendusväljakutel külvatakse käsitsi reoveesettele heinaseeme (nt karjamaa raihein või aasnurmikas) [39]. Kokku saadakse Hiiumaa reoveepuhastites 4 389 tonni stabiliseeritud setet aastas, päevas tekib reoveesetet kuivaines 180 kg [2]. Stabiliseeritud settest 20% kasutatakse ära haljastuses, ülejäänud 80% ladustatakse puhasti territooriumile kuhja ning ümbritsetakse muldvalliga [7].

Ida-Viru maakonna suurimad reoveepuhastid on Kohtla-Järve reoveepuhasti, mida haldab OÜ Järve Biopuhastus, ning Narva reoveepuhasti. Kohtla-Järve reoveepuhastis

kompostitakse reoveesette aunades, kus tugimaterjalina kasutatakse hakkpuitu. Kokku tekib päevas reoveesetet kuivaines 4 000 kg. [2] Narva reoveepuhastis stabiliseeritakse sete algul anaeroobselt metaantankis [8]. Stabiliseeritud käärimisjääk kasutatakse 20% haljastuses, 60% rekultiveerimisel ning 20% kuhjub reoveepuhasti territooriumil. Päevas tekib Narva reoveepuhastis reoveesetet kuivaines 3 000 kg. Kokku saadakse Ida-Virumaa reoveepuhastites 13 385 tonni valmis setet aastas. [2, 6]

Jõgeva maakonna suurima reostuskoormusega reoveepuhasti on Põltsamaa reoveepuhasti. Sete tahendatakse tsentrifuugimise teel ning antakse edasiseks käitlemiseks Põltsamaa jäätmekäitlusjaama, Tartu reoveepuhastusjaama [9] või mujale. Jõgeva maakonna mõningaid väikepuhasteid haldab AS Emajõe Veevärk, mille setted viiakse Emajõe Veevärgi suurematesse puhastitesse. Päevas tekib reoveesetet kuivaines 800 kg. Kokku saadakse maakonna reoveepuhastitest 4 885 tonni setet aastas. [2, 6]

Järva maakonna suurim puhasti on Paide reoveepuhasti, kus sete kompostitakse aunades, tugimaterjalina põhku kasutades. Valmis settekompost kasutatakse 100% põllumajanduses. Päevas tekib reoveepuhastis reoveesetet kuivaines 1 000 kg. Kokku saadakse Järva maakonnas 6 092 tonni settekomposti aastas. [2, 6]

Lääne maakonna suurim reoveepuhasti on Haapsalu reoveepuhasti, mida haldab AS Haapsalu Veevärk [2, 6]. Tihendatud sete kompostitakse kompostimisväljakul, segades reoveesetet turba ja saepuruga [10]. Valmis kompost kasutatakse 60% haljastuses ning ülejäänu põllumajanduses. Kokku tekib reoveepuhastis reoveesetet 500 kg KA/d ning kokku saadakse maakonnas 1 732 tonni settekomposti aastas. Mõningaid väikepuhasteid optimeerib ühiselt AS Matsalu Veevärk. [2, 6]

Lääne-Viru maakonna suurim puhasti on Rakvere reoveepuhasti, mida haldab AS Rakvere Vesi [2, 6]. Tahendatud reoveesete antakse üle Lääne-Viru Jäätmekeskusele, kus see kompostitakse aunades. Tugimaterjalina lisatakse põhku. [11] Kokku tekib puhastis reoveesetet 2 300 kg KA/d ning maakonnas saadakse settekomposti 41 922 tonni aastas, millest ligikaudu 80% moodustab AS Estonian Cell settekompost [2, 6].

Põlva maakonna suurim puhasti on Põlva reoveepuhasti, kus sete kompostitakse tugiainega segatuna trummelkompostris [12], ning peale seda jäetakse aunadesse järelvalmima. Kompost kasutatakse 60% haljastuses ning ülejäänud osa kuhjub reoveepuhasti

territooriumil. Kokku tekib puhastis reoveesetet 1 200 kg KA/d ning kokku saadakse 5 181 tonni settekomposti aastas kogu maakonna kohta. [2, 6]

Pärnu maakonna suurim puhasti on Mõrra reoveepuhasti, mida haldab AS Pärnu Vesi. Antud puhastisse pumbatakse kogu Pärnu linna, osavaldade ning lähivaldade reovesi. Tahendatud sete kompostitakse lahtiselt aunades. [13] Valmis setet kasutatakse 60% haljastuses, 20% rekultiveerimisel ning ülejäänud osa kuhjub reoveepuhasti territooriumil. Kokku tekib Mõrra reoveepuhastis reoveesetet 3 950 kg KA/d ning kokku saadakse 9 777 tonni settekomposti aastas kogu maakonnas. [2, 6]

Rapla maakonnas on Rapla reoveepuhasti piirkonna suurim [2]. Tahendatud sete veetakse Mäepere jäätmejaama kompostimisväljakutele, kus kogu valminud kompost antakse kasutada põllumajandusse [14]. Kokku tekib Rapla reoveepuhastis reoveesetet 301 kg KA/d. Kokku saadakse kogu maakonnas 2 103 tonni settekomposti aastas. [2, 6]

Saare maakonna suurimaks puhastiks on Kullimäe reoveepuhasti, kuhu veetakse kõigi maakonna väikeste reoveepuhastite reoveesete. Sete kääritatakse anaeroobselt, mõnikord lisatakse metaantanki ka muid vedeljäätmeid, mille reostuskoormus on väga suur. Tahendatud käärimisjääk veetakse kompostimisväljakule, kus see segatakse tugiainega. [15] Tugiaineplats on katuse all. Valmis komposti kasutatakse 80% haljastuses ning ülejäänud osa põllumajanduses. Kokku tekib reoveepuhastis setet 900 kg KA/d. Maakonnas saadakse aastas 2 244 tonni settekomposti aastas. [2, 6]

Tartu maakonna reoveepuhasteid haldavad AS Tartu Veevärk ning mõningal määral AS Emajõe Veevärk. Tartu Veevärgi poolt suurim hallatav puhasti on Tartu reoveepuhasti, kus sete kääritatakse anaeroobselt metaantankides, seejärel tahendatakse ning peale seda järelkompostitakse lahtistes aunades kompostimisväljakutel. Tugiaineks on puukoor. Valmiskompost kasutatakse 80% põllumajanduses ning ülejäänud osa haljastuses. [6] Kokku tekib reoveesetet 8 300 kg KA/d [2].

AS Emajõe Veevärgi poolt suurim hallatav reoveepuhasti on Elva reoveepuhasti, kus sete tahendatud sete kompostitakse kompostimisväljakutel, lisades reoveesetele põhku ning turvast. Kompostimisväljak on katuse all. Valmiskompost kasutatakse 90-100% haljastuses. Kokku tekib Elvas reoveesetet 300 kg KA/d. Tartu maakonnas saadakse settekomposti aastas 13 184 tonni. [2, 6]

Valga maakonna suurim puhasti on Valga reoveepuhasti, kus sete kompostitakse trummelkompostris. Trumlist väljuv kompost jäetakse setteväljakutele järelvalmima. [16] Valmiskomposti kasutatakse 90% haljastuses ning 10% põllumajanduses. Reoveepuhastis tekib reoveesetet 1 000 kg KA/d. Kokku saadakse aastas Valga maakonnas 4 626 tonni valmis setet. [2, 6]

Viljandi maakonna suurim puhasti on Viljandi reoveepuhasti, kuhu setet tuuakse ka kõikidest väiksematest puhastites. Tahendatud liigmuda stabiliseeritakse aunkompostimise teel, lisades settele põhku, puukoort ning turvast. Kui kompost on valmis, transporditakse see järelvalmimisväljakule. [17] Valmiskomposti kasutatakse 30% haljastuses, 50% põllumajanduses ning 20% kuhjub reoveepuhasti territooriumil [6]. Puhastis tekib reoveesetet 1 000 kg KA/d. Kokku tekib aastas settekomposti 5 148 tonni. [2, 6]

Võru maakonna suurim reoveepuhasti on Võru reoveepuhasti. Tahendatud sete veetakse kompostimisväljakule, kus sete segatakse põhuga. [18] Valmiskompostist 90% kuhjub järelvalmimisplatsil ning 10% kasutatakse haljastuses. Reoveepuhastis tekib reoveesetet 1 000 kg KA/d. Kokku tekib Võru maakonnas 4 123 tonni komposti aastas. [2, 6]

Tabelis 1.1 on toodud koondandmed Eesti settekäitlusest, reostuskoormusest ning kuivainesisaldusest. Nagu näha on peamine settekäitlusviis aunkompostimine.

Tabel 1.1. Settekäitlus maakonniti [2, 6]

| Maakond | Suurim RVP | RVP reostuskoormus (IE) | KA peale tahendamis t (%) | Töödeldud sette hulk maakonnas t/a | Stabiliseerimise viis |
|----------------|-------------------|--------------------------------|----------------------------------|---|---|
| Harju | Paljassaare | 386 600 | 27 | 37 557 | Anaeroobne settekäitlus ja järelkompostimine aunades |
| Hiiu | Kärdla | 2 833 | - | 4 389 | Stabiliseerimine settetahendusväljakutel |
| Ida-Viru | Kohtla-Järve | 75 000 | 19 | 13 385 | Aunkompostimine |
| Jõgeva | Põltsamaa | 18 500 | 18 | 4 885 | Kohapeal ei stabiliseerita, sete antakse üle jäätmekäitlejale või Tartu reoveepuhastusjaama |
| Järva | Paide | 15 000 | 19-20 | 6 092 | Aunkompostimine |
| Lääne | Haapsalu | 9 095 | 19 | 1 732 | Aunkompostimine |
| Lääne-Viru | Rakvere | 74 000 | 23 | 41 922 | Kohapeal ei stabiliseerita, sete antakse aunkompostimiseks jäätmekäitlejale |
| Põlva | Põlva | 32 000 | 17 | 5 181 | Reaktorkompostimine ja järelkompostimine aunades |
| Pärnu | Mõrra | 68 333 | 20 | 9 777 | Aunkompostimine |
| Rapla | Rapla | 8 800 | 15 | 2 103 | Kohapeal ei stabiliseerita, sete antakse aunkompostimiseks jäätmekäitlejale |
| Saare | Kullimäe | 36 350 | 24-27 | 2 244 | Anaeroobne settekäitlus ja järelkompostimine aunades |
| Tartu | Tartu | 120 000 | 17-20 | 13 184 | Anaeroobne settekäitlus ja järelkompostimine aunades |
| Valga | Valga | 15 000 | 18 | 4 626 | Reaktorkompostimine ja järelkompostimine aunades |
| Viljandi | Viljandi | 18 283 | 13-15 | 5 148 | Aunkompostimine |
| Võru | Võru | 15 000 | 18-20 | 4 123 | Aunkompostimine |

1.2. Reoveesette käitlustehnoloogiad

Kuna settekäitluse peamine eesmärk on sette mahu vähendamine, orgaanilise aine lagundamine ning patogeensete mikroorganismide hävitamine, siis on reoveesette käitlemist võimalik tehnoloogiliselt jagada mitmeks tegevuseks [19, 35]:

- Tihendamine – protsess kontsentreerituma vedelsette saamiseks;
- Stabiliseerimine – protsess, milles orgaanilised (lahustunud või kübemelised) ained muundatakse kas anorgaanilisteks või väga aeglaselt lagunevateks aineteks;
- Tahendamine – reoveesette veesisalduse vähendamine pastataolise või taheda sette saamiseks mitmesuguseid, tavaliselt looduslikke või mehaanilisi võtteid rakendades;
- Hügieniseerimine – reoveesette käitlemine selleks, et settes leiduvad parasiidid ja patogeenid oleks inaktiveeritud või nende arv nõutava tasemeni vähendatud.

Reoveesete on hästi veerohke ja loovutab vett halvasti. Vesi on reoveesettes kolmel moel: setteosakeste sees olev ehk molekulaarne vesi (8%), kilevesi ehk kolloidselt seotud vesi (22%) ning vesi, mis paikneb setteosakeste vahel (70%) [19]. Kuna reoveesete eemaldatakse aktiivmudaprotsessist väga vedelana, ligikaudu vaid 1%-lise kuivainesisaldusega, siis settekäitluse esmane eesmärk on selle veesisalduse vähendamine. Tänu tihendamisele ning tahendamisele on reoveesette kogust võimalik vähendada 3–30 korda. [2]

Hügieniseerimise ehk desinfitseerimise eesmärk on reoveesettes olevate haigustekitajate hävitamine (*Escherichia coli*, salmonella ja helmindid) [20]. *Escherichia coli* põhjustab inimeste soolestikus tõsiseid terviseprobleeme, salmonella bakter aga toidumürgitust, mille käigus tekib inimesel kõhulahtisus ning oksendamine. Helmindid põhjustavad inimestel erinevaid seedehäireid ning nõrkust. Reoveesette stabiliseerimise abil ei soovita saada mikroobivaba settekomposti, sest ka kompostimise viivad läbi mikroorganismid ning ka põllumuld, kuhu kompost laotatakse, sisaldab mikroobe. Eesmärk on vältida nakkushaiguste levikut.

Stabiliseerimise peamine eesmärk on seega settes oleva orgaanilise aine sisalduse vähendamine, haisu vähendamine, sette massi vähendamine, mineralisatsiooni suurendamine ning haigustekitajate sisalduse vähendamine. Sette stabiliseerimine algab sellest, kui reoveesete on välja võetud reoveepuhasti puhastusprotsessist. Sete loetakse

stabiliseerunuks, kui selles sisalduv orgaaniline aine on keskkonnale ning elusloodusele ohutuks muudetud [2, 20] ning vastab peatükis 1.6. toodud arväärtustele [20, 32].

Setet on võimalik stabiliseerida [21]:

- Aeroobselt;
- Anaeroobselt;
- Keemiliselt;
- Füüsikaliselt;
- Humifitseerides.

Aeroobse settekäitluse võib jagada kaheks: vedelstabiliseerimine aktiivmudapuhastuse käigus ning tahestabiliseerimine kompostimisel. Aktiivmudapuhastuse käigus paranevad sette stabiliseerimisomadused, sest orgaaniline aine lagundatakse mikroorganismide abil juba vee puhastamise käigus. Mida kauem kestab aktiivmudapuhastus, seda suurem on muda vanus ning seda paremini on sete stabiliseeritud. [2] Muda vanus üle 25 päeva võib lugeda stabiliseerituks [42]. Kestvusohutuse korral on muda vanus üle 25 päeva [21]. Isegi kui sete stabiliseerub juba õhustuskambris, kompostitakse see peale tihendamist ja tahendamist enamjaolt üle. Seda nõuab ka „Reoveesette põllumajanduses, haljastuses ja rekultiveerimisel kasutamise nõuded“ määrus, stabiliseerimine algab alles siis, kui sete on eemaldatud reovee puhastusprotsessist [20].

Kompostimine on reoveepuhastist saadava tahendatud sette orgaaniliste ainete peamiselt aeroobne lagundamine mikroobide, seente ja muude mullaasukate kaasabil selleks, et neid muuta huumusetaoliseks aineks [26]. Kompostimine on üks lihtsamaid ning laialt levinumaid viise sette stabiliseerimiseks. Kompostimine leiab aset kontrollitud tingimustes hapnikurikas keskkonnas. Mikroorganismid lagundavad tahendatud settes oleva orgaanilise aine, mille tulemuseks on bioloogiliselt stabiliseeritud materjal – kompost. [23] Kompostimise käigus vabanevad soojus, lämmastikuühendid, süsihappegaas ning veeaur [33, 22]. Kompostimise jaoks segatakse sete tugiainega. Reoveesetekomposti on võimalik turustada tootena [32], mis peaks avardama turgu ja motiveerima reoveepuhasteid selle järele toimima.

Sette anaeroobne käitlemine on reoveesettes oleva orgaanilise aine lagundamine bakterite poolt hapnikuvaeses keskkonnas, mille tulemusena tekib biogaas ning järele jääb stabiliseeritud käärimisjääk [20]. Temperatuur jääb käärimisel enamjaolt mesofiilsesse vahemikku 35–38 °C. Reoveesetet on kõige mõistlikum anaeroobselt käidelda kas reaktoris (tahkena) või metaantankis (vedelana). [22] Eestis ei ole reoveesette kuivkääritamine

kasutusel, kuid seda on kavandatud Pärnusse [36]. Ehkki Eestis on käärimisjäägist toote saamise kohta omaette määrus [37], siis reoveesette käärimisjäägile see ei laiene.

Keemiliselt on võimalik stabiliseerida tahendatud reoveesetet, lisades settele kustutatud ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) või kustutamata (CaO) lupja. Lubja lisamisel tõuseb reoveesette pH 12-ni, mis hävitab patogeene, kuid orgaanilise aine sisaldus jääb samaks. Eestis lubistabiliseerimist ei kasutata. [22] Keemiliselt stabiliseeritud setet ei ole Eestis võimalik tootena sertifitseerida.

Humifitseerimine on sette stabiliseerimine looduslähedasel moel, kus vedel sete pumbatakse või tahendatud sete laotatakse suurtele humifitseerimisväljakutele laiali ning sellele külvatakse peale taimestik (pilliroog, raihein vms). Taimestik niidetakse hooaja lõpus maha. Viie aasta möödudes on toiteainerikas sete humifitseerunud ning kasutusvalmis. [22] Humifitseerimise teel stabiliseeritud setet ei ole Eestis praegu võimalik tootena sertifitseerida.

1.3. Kompostimine

1.3.1. Lähte- ja tugained

Kompostimise toimimist mõjutavad peamiselt järgmised parameetrid: temperatuur, niiskus, hapnik ning õhustamine, süsiniku ja lämmastiku suhe (C:N), pH tase ning kompostiauna suurus [26], mida kõike on võimalik mõjutada lähte- ja tugimaterjalide valikuga. Ehkki reoveesette kompostimise peamine eesmärk on stabiliseerida sete, siis alameesmärke võib olla teisigi, sest puhasti võib vastu võtta ka muid jäätmeid, kas tulu teenimise eesmärgil või selleks, et asendada kallimaid tugaineid:

- Reoveepuhasti võib vastu võtta setteid toiduainetööstusest (Tartu, Kuressaare). Energiarikkad setted annavad juurde biogaasi, hoogustavad kompostimist ning võivad anda lisaissetulekut, kuid kui neid käsitletakse loomsete kõrvalsaadustena, siis tuleb kogu sette(komposti)partii hügieniseerida (70 °C , 1 h, 12 mm) [40].
- Reoveepuhasti võib tugiainetena vastu võtta mitmesuguseid jäätmeid (aia- ja haljastujäätmed). Sel juhul tuleb kontrollida, kas need on loetletud määruse nr 24 lisas nr 1. Kindlasti on vaja jäätmete üle arvet pidada ning võõrised välja sõeluda. Ehitus- ja lammutuspuitu tuleb vältida.

- Reoveepuhasti võib tugiatena kasutada mitmesuguseid loodusomaseid materjale, mis ei ole jäätmeseaduse [38] subjekt.

Reoveesette kompostimise jaoks tuleb tahendatud sette hulka lisada tugimaterjali. Kompostisegu niiskussisaldust aitab vähendada see kui lisatav tugiaine on kuiv. Lämmastiku poolest rikka sette süsiniku ja lämmastiku suhte parandamiseks peaks tugiaine olema süsinikurikas. Tugimaterjali abil tuleb kompostitav reoveesete muuta poorsemaks, et parandada õhu liikumist, mis aitab kaasa mikroobide elule. [24] Kui tugiatet lisada tavapärasest suuremas koguses, muudab see massi veelgi kuivemaks, parandab C ja N suhet ning soodustab temperatuuri tõusmist [44]. Peamised tugiatet, mida settele Eestis lisatakse on puukoor, saepuru, põhk, turvas ja hakkpuit (tabel 1.2) [24].

Tabel 1.2. Tugimaterjalide võrdlus

| Tugiaine | | Seob vett | Muudab poorseks | Tahab segamist | Lisab süsinikku | Lisab | pH | Hind | Saadavus | Laguneb | Korduvkasutatav | Mõju |
|-----------|----------|-----------|-----------------|----------------|-----------------|-------|----|------|----------|---------|-----------------|------|
| Põhk | Kuiv | + | + | + | + | + | 7 | o | o | + | + | + |
| | Märg | – | + | + | | | | | | | | |
| Turvas | Kuiv | + | + | + | – | – | <7 | – | + | – | – | o |
| | Märg | – | – | + | | | | | | – | | |
| Hakkpuit | Peen | + | + | + | + | – | 7 | – | + | – | + | + |
| | Jäme | – | + | + | | | | | | | | |
| Puukoor | Peen | + | + | + | + | – | 7 | – | + | – | + | + |
| | Jäme | – | + | + | | | | | | | | |
| Puulehed | Värske d | – | + | + | – | + | 7 | + | o | + | – | o |
| | Vanad | – | – | + | | | | | | | | |
| Saepuru | Kuiv | + | + | + | + | + | <7 | – | + | + | – | + |
| | Märg | – | – | + | | | | | | | – | |
| Muld/savi | | + | – | + | – | – | 7 | + | + | – | – | – |
| Hein | Kuiv | + | + | + | + | + | 7 | – | o | + | – | + |
| | Märg | – | – | + | | | | | | | | |

Märkused:

1. Tähis „+“ tähendab positiivset mõju, soovitatav, taskukohane.
2. Tähis „–“, tähendab negatiivset mõju, ebasoovitatav, kallid.
3. Tähis „o“ tähendab hooajaline, kaheldav, oleneb olukorrast, nii-ja-naa.

1.3.2. Niiskus, poorsus, hapnikusisaldus

Kompostitav mass peab olema parajalt niiske. Kuivas keskkonnas mikroorganismid elada ei saa, liigne vesi tõrjub aga pooridest õhu ning muudab massi anaeroobseks [26]. Reoveesette kompostimisel muutub niiskus suurtes piirides: algul on settekompost pigem liiga niiske, seda eriti siis, kui tugiainega kokku hoitakse. Kompostimise lõpu poole võib juhtuda, et settekompost muutub liiga kuivaks ja seda tuleks niisutada. Liigne niiskus alandab komposti temperatuuri, mis tõttu pikeneb protsessi stabiliseerumise ning küpsemise aeg. Optimaalne veesisaldus aunas on 50-60% [28]. Kui aga kompostiaun jääb vihma kätte või lume alla, võib see niiskuse tõttu laiali valguda.

Kompostitava massi suhtelist niiskust saab arvutada valemist 1.1 [18]:

$$M_{ks} = \frac{M_t G_t + 100 G_j}{G_j + G_t} \% , \quad (1.1)$$

kus M_{ks} on segu kompostimiseelne ja M_t tugiaine suhteline niiskus %, G_j kompostitavate jäätmete ning G_t tugiaine märgmass tonnides [26]. Kuivana hoitud tugimaterjal aitab siduda niiskust.

Liigne niiskus võib olla põhjustatud vihmast, lumest või lumesulamisveest. Et sademetest tekkivaid probleeme vältida, tuleks kompostimisplats ehitada katuse alla. Kuna platsi katuse alla ehitamine on väikestele puhastitele ülejõu, oleks otstarbekas aunas veekindla materjaliga kinni katta või suuremalt kuhjata, see aitab takistada auna läbivettimise. Samuti peab olema auna kuju selline, et sademevesi saaks mööda auna külgi maha voolata. [24]

Poorsus. Kompostiaun peab olema võimalikult poorne, et õhk sellest loomulikult läbi käiks. Et hapnikuvarustus oleks aunas piisav, peab poorsus olema vähemalt 30 –60% [25]. Sobiva poorsusega on aunas õhuvahetus loomulik, lagugaasid liiguvad aunas ülesse ning altpoolt tuleb õhk asemele. Poorsust aitavad parandada osad tugiained (nt põhk, puukoor, hakkpuit), kuid kõige efektiivsem on auna mehaaniline läbisegamine.

Hapnik. Kompostimise käigus tarbivad mikroobid suures koguses hapnikku, mis on peamiselt vajalik nende elutegevuseks. Et tagada piisav hapnikusisaldus aunas, on vaja seda segada, või on vaja hapnikku õhustustorustiku abil auna sisse puhuda. Vastasel korral muutub kompostimisprotsess anaeroobseks. Õhupuudus takistab protsessi kulgu ning muudab selle ebameeldivaks, kompost läheb haisema ning eraldub mürgiseid gaase (nt

väävelvesinik). Et kompostimine peab olema aeroobne, peab miinimum hapniku kontsentratsioon auna poorides olema 5%, sest sellise kontsentratsiooni juures suudavad veel mikroorganismid elada. Soodsaks hapnikusisalduseks peetakse 10%. [22] Nagu varasemalt mainitud, siis sobiva poorsusega aunades on õhustus loomulik, mida värskem on aun, sest rohkem on vaja hapnikku. Kui kompost on valmis, siis õhuvajadus väheneb, sellest hoolimata on vaja valmiskomposti aeg-ajalt segada või sundõhustada.

1.3.3. Süsiniku ja lämmastiku suhe

Süsinik ja lämmastik on mikroorganismide elutegevuseks vajalikud komponendid. Mikroorganismid kasutavad süsinikku energia saamiseks ning lämmastikku proteiinide saamiseks ning paljunemiseks. [22]

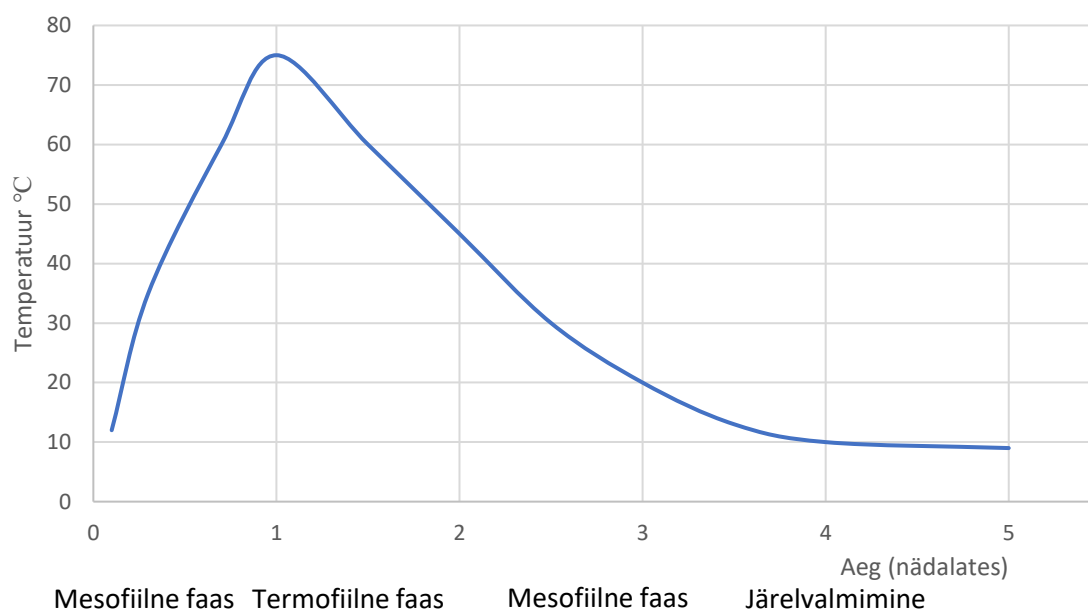
Reoveesette C:N on 10:1, mis on liiga madal. Kompostimiseks soodsaim süsiniku ja lämmastiku suhe on vahemikus 20:1 kuni 30:1. Kui C:N suhe on liiga madal, tuleb lisada komposti hulka süsinikurikast tugiainet (nt saepuru ja hakkpuit) (tabel 1.3). Madal süsiniku ja lämmastiku suhe vähendab bioloogilist aktiivsust ning selle tulemusena hakkab eralduma ammoniaaki, tänu millele tekib ebameeldiv lõhn. Liiga suure süsiniku – lämmastiku suhte korral (40:1) aeglustub mikroorganismide elutegevus ning kompostimise protsess aeglustub. [22, 29]

Tabel 1.3. Enamlevinud C:N tugiainetes [24, 25]

| Tugiaine | Sette ja tugiaine mahuvahekord | Süsiniku–lämmastiku (C:N) suhe | Kuivainesisaldus (%) |
|----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| Puukoor | 1:1,5–2,0 | 110–140 | 50 |
| Hakkpuit | 1:1–1,2 | 250–320 | 50–60 |
| Põhk | 1:3–3,5 | 85–100 | 50–65 |
| Turvas | 1:1,5–2,0 | 45–50 | 75 |
| Haljastujäätmed (puulehed) | 1:1,5 | 40–60 | ≤50 |
| Töötlemata puidujäätmed | 1:1,5–2,0 | 200 | 80–85 |

1.3.4. Temperatuur

Kompostimisprotsessi võib temperatuuri järgi jagada kahte faasi: mesofiilne (30–45 °C) ning termofiilne faas (45–75 °C) [20]. Kõrge temperatuuri saavutamine on kompostimisel väga tähtis, kuna see hoogustab bioloogilisi protsesse, kiirendab orgaanilise aine lagundamist, soodustab liigvee aurustumist ning tõvestavate mikroorganismide hukkumist. Kompostimisprotsessi algaasis tõuseb settekomposti temperatuur 30–45 kraadini ehk toimub mesofiilne faas, peale seda algab termofiilne faas, mille kestel temperatuur küündib 60–70 kraadini (joonis 1.1). Selle käigus enamik settes või jäätmeis olevatest tõvestavatest organismidest hukkub (tabel 1.4).



Joonis 1.1. Temperatuuri muutumine kompostimise käigus [25].

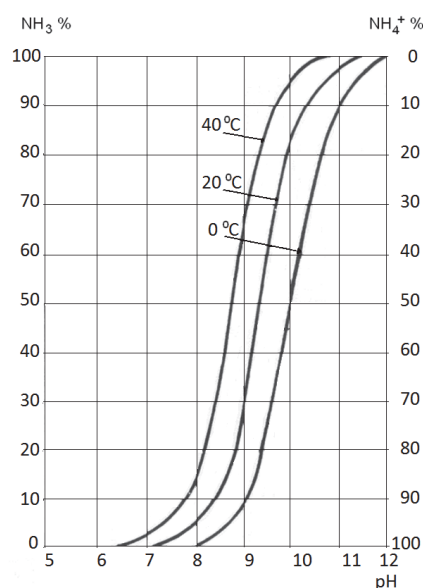
Tabel 1.4. Mõningate bakterite hävitamiseks vajalikud temperatuurid ja viibeaeg [25]

| Bakteri nimetus | Vajalik temperatuur ja viibeaeg |
|---|--|
| <i>Salmonella typhosa</i> | Ei paljune temp. üle 46°C, surevad temp. 55–60°C kolmekümne ning 60°C juures 20 minutiga; kompostis hävivad kiiresti |
| <i>Salmonella sp.</i> | Surevad 55°C juures ühe tunniga ning 60°C juures 15–20 minutiga |
| <i>Shigella sp.</i> | Surevad 55°C juures ühe tunniga |
| <i>Escherichia coli</i> | Enamik sureb 55°C juures ühe tunniga ning 60°C juures 15–20 minutiga |
| <i>Entamoeba histolytica</i> cysts | Surevad 45°C juures mõne minutiga ning 55°C juures mõne sekundiga |
| <i>Taenia saginata</i> | Surevad 55°C juures mõne minutiga |
| <i>Trichinella spiralis</i> larvae | Hävivad 55°C juures kiiresti, 60°C juures koheselt |
| <i>Brucella abortus</i> or <i>Br. Suis</i> | Surevad 62–63°C juures kolme minutiga ning 55°C juures alla tunni jooksul |
| <i>Mikrococcus pyogenes</i> var. <i>aureus</i> | Surevad 50°C juures kümne minutiga |
| <i>Streptococcus pyogenes</i> | Surevad 54°C juures kümne minutiga |
| <i>Mycobacterium tuberculosis</i> var. <i>hominis</i> | Surevad 66°C juures 15–20 minutiga, kuumutamisel 67°C juures silmapilkselt |
| <i>Corynebacterium diphtheriae</i> | Surevad 55°C juures 45 minutiga |
| <i>Necator americanus</i> | Surevad 45°C juures 50 minutiga |
| <i>Ascaris lumbricoides</i> eggs | Surevad üle 50°C juures alla tunni jooksul |

Peale termofiilset faasi langeb temperatuur 35–55 kraadini ning algab mesofiilne küpsemisfaas, mille käigus lagundatakse raskesti lagunevad süsivesikud (kiudained, vaigud, tselluloos, ligniin, vahad) [25], sh lagunema hakkab ka tugimaterjal ise. Kõige lõpus järgneb jahtumis- ja järelvalmimisfaas, mille lõpuks tekib huumus. Protsessi käigus tuleb komposti segada temperatuuri ühtlustamiseks, kuna temperatuur ei ole kogu protsessis samasugune (tuumas on kõrgemad temperatuurid ning pinnal madalamad) ning komposti hapnikuga rikastamiseks. Kompostiauna temperatuur ei tohi minna liiga kuumaks, sest temperatuuril 75–80 kraadi lõpeb mikrobioloogiline tegevus ning kompost hakkab kuivama. [24] Külmal ajal kompostimise eripära on kirjeldatud peatükis 1.5.

1.3.5. pH

Optimaalne pH vahemik kompostiaunas on 6 kuni 8. Tavaliselt jääb see vahemikku 5 kuni 9 [22]. Kompostimise algaasis võib pH langeda alla 6 ning komposti happelisus tõuseb, see pärsib mikroorganismide tööd. Kompostimisprotsessi termofiilses faasis pH tõuseb 8 kuni 8,5-ni, tänu sellele hakkab lämmastik ammoniaagina protsessist eralduma. Lendunud ammoniaagi tõttu väheneb valmiskomposti väetisväärtus. Mida kõrgem temperatuur ja kõrgema pH-ga kompost, seda rohekm lendub ammoniaaki (joonis 1.2). Valmis kompostil jääb pH vahemikku 7,5 kuni 8. [29].



Joonis 1.2. NH₃ ja NH₄⁺ vahekord kompostitavas massis olenevalt pH-st ja temperatuurist [41].

1.3.6. Kompostiauna suurus

Kompostiaun peab olema piisavalt suur, et hoida aunas olev soojus ning niiskus, samas aga küllalt väike, et tagada õhu tsirkulatsioon aunas. Mida väiksem on kompostihunnik, seda suurem on soojuse kadu. Selleks, et tagada piisav suurus, rajatakse aunad vaaludesse. Kompostimisauna pikkus ei ole oluline. [22] Peale auna valmis segamist on auna mõõtmed pigem väiksed, kuid see sõltub reoveepuhasti aunasegaja mõõtmetest ning massi koredusest, kui suurt auna on võimalik teha. Liiga kõrget auna teha ei tohi, kuna see võib enda raskuse all tihedaks vajuda ning õhu liikumist takistada. [24] Aun jääb protsessi käigus järjest

väiksemaks, seega tuleks aunasid järjest üksteisega kokku tõsta ning läbi segada. Vastu talve tuleks aunad teha pigem suuremad, et soojusekagu ei oleks nii kiire. Arvestada tuleb, et selline aun ei tohi olla tehtud värskest, väga suure hapnikutarbega kompostist. Kui hapnikku on vaja juurde anda, aga auna segada ei saa, tuleb auna sisse õhku puhuda.

1.4. Aunkompostimistehnoloogia

Kuidas aunasid tehakse

Peamised sette kompostimise meetodid on aukompostimine (Eestis kõige levinum) ning reaktorkompostimine. Aunkompostimine leiab aset vett mitteläbilaskval asfaltväljakul, mis on varustatud nõrgvee ärajuhtimissüsteemiga või drenaažiga. [22] Kompostimist alustatakse reoveesette kuhjamisega auna, millele lisatakse tugimaterjal ning seejärel segatakse. Aunad tehakse tavaliselt 1,5–2 m kõrged ning alt 3–5 m laiad (laius sõltub tavaliselt aunasegaja ehk aunapöörli mõõtmetest), aunade pikkus oleneb reoveepuhasti kompostimisplatsi suurusest ja sette hulgast. Mida koredam on mass, seda suuremad võivad olla auna mõõtmed, kuid tuleb jälgida, et aun omaenese raskuse tõttu liiga tihedaks ei vajuks. [22, 24, 26]

Aunasid tuleb regulaarselt segada, et tagada mikroorganismidele aeroobne elukeskkond. Mida sagedamini segada, seda kiirem on lagunemine. Segamine aitab õhustada auna, aitab lagugaasidel lenduda ning hajutab materjalis niiskust, toitaineid ja ka tugimaterjali. Segamise käigus lõhutakse agregaadid ning kompost muutub sõmeraks. Liigsest segamisest tuleb külmal ajal hoiduda, kuna see jahutab auna liigselt maha ning see on ka kulukas. Segada on vaja jahutamiseks kui aunas tõuseb temperatuur üle 70 °C.

Aunasid segatakse spetsiaalsete masinate (joonis 1.3) abil, et välimine hapnikurikas ning niiske kiht seguneks tuumaga. [24]



Joonis 1.3. Aunapöörliid: a) Elva (Backhus 16.30); b) Kohtla-Järve (Backhus 17.50); c) Võru (CMC ST300); d) Paide (Terex TWT500).

Mõnikord kombineeritakse aun- ja reaktorkompostimist või siis kompostitakse aunades üle käärimisjääk (nt Tartus ja Tallinnas).

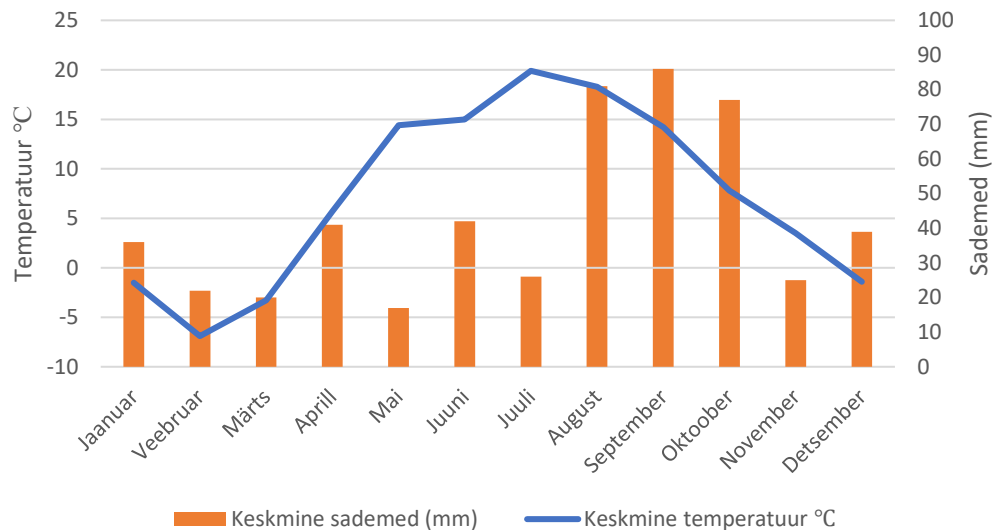
Reaktorkompostimine toimub spetsiaalses kinnises reaktoris, kus kompostitavat massi segatakse, õhustatakse, niisutatakse ning soojendatakse (kui vaja). Kuigi kompostimine reaktoris päris lõpuni ei jõua, siis protsessist väljub siiski stabiilne kompost, mis tervist ei ohusta. Reaktorkompostimisel on kasutuses erinevaid reaktoreid, mis erinevad üksteisest peamiselt segamisviisi poolest: kamber-, trummel-, torn- ning tunnelreaktorid. Reaktorkompostimist peetakse ohutumaks kui aunkompostimist. Reaktoris peab olema piisavalt kõrge temperatuur, et tagada patogeenide ning umbrohuseemnete hävinemine, kuid samas peab temperatuur olema piisavalt madal, et säilitada mikroorganismide aktiivne tegevus. Õhk juhitakse protsessi ventilatsiooni teel, mis lülitatakse tööle komposti teatud temperatuuri korral. Kuna lagugaasid kogutakse kokku ja puhastatakse õhu-biofiltris, siis reaktorkompostimisega haisu ei kaasne. [22]

1.5. Kompostimine külmal ajal

Kuna kompostimine toimub Eestis peamiselt lahtise taeva all, siis ilmastik mõjutab seda väga palju. Külmal ajal on peamiseks probleemiks auna väliskihi ära külmumine, mis ei lase aunasid segada, tehnika mitte käivitumine ning aunas olev madal temperatuur, mis ei lase protsessil toimuda. Samuti puudub talvel valmis settekompostile turg ning valmiskompost kuhjub, seda peab õhustamiseks segama või sundõhustama. Väikestel reoveepuhastitel on aunasegajad väikesed, mis tõttu aunad pole piisavalt suured, et takistada läbikülmumist. Üks võimalus oleks aunad talvel kinni katta, kuid see on liiga mahukas töö.

Eestis on reoveesette aunkompostimine valdavalt hooajaline. Aprillist oktoobrini toimub reoveepuhastites aunkompostimine aktiivselt, kuid novembrist märtsini sete vaid kuhjatakse kompostimisväljakutele hunnikusse või vaaludesse ning ei segata. Sageli ei lisata laoplatsile kogutavale settele isegi mitte tugiainet, st tahendatud sete pannakse ootele. Talvel katkeb kompostimine, sest külmal ajal on raske saavutada efektiivset kompostimist. [2] Kuigi kompostimisel tõuseb temperatuur aunas, siis külmal ajal on ilmastiku mõju piisavalt suur, et kompostiaun jahtub niivõrd palju maha, et protsess lakkab [30]. Külmas, alla 5 kraadi, kompostiaunas elutegevus puudub. Kui massi temperatuur on alla 20 kraadi, siis elutegevus aeglustub märgatavalt [24, 25].

Nagu on näha jooniselt 1.4, siis alates aprillist kuni oktoobrini on 2018. aasta keskmine temperatuur olnud üle 5 °C, mis tähendab, et sel perioodil on temperatuur aunkompostimiseks sobiv.



Joonis 1.4. 2018. aasta keskmised sademed ja temperatuur (Riigi Ilmateenistuse andmete põhjal [31]).

Eesti kliimas on otstarbekas aunad soojuskao vähendamiseks ning liigse vihma, lume ja tuule vältimiseks külmal ajal kinni katta veekindla kattega (geotekstiil või spetsiaalne õhku läbi laskev katemembraan). Aunu võib külma vastu katta ka mitmesuguste muude puistematerjalidega (tabel 1.6). [24]

Tabel 1.6. Kompostiaunade katmisviisid [24]

| Kompostimisviis | Plussid | Miinused |
|---------------------------------|---|---|
| Katmine põhuga | Odav, kui põhk endal olemas Lihtne ja odav korraldada | Töömahukas, käsitsi pole reaalne Põhk tuleb hiljem eemaldada, et ta ei seguneks valmiskompostiga |
| Katmine valmiskompostiga | Odav, kui kompost endal olemas Lihtne ja odav korraldada Kattekihti ei pea hiljem eemaldama | Töömahukas, käsitsi pole reaalne Kallis osta, kui endal olemas ei ole |
| Katmine geotekstiiliga | Kerge peale ja maha tõmmata | Geotekstiil on kallis materjal, mis muutub aja jooksul rabedaks ja puruneb |

| | | |
|---------------------------------|-------------|--|
| | | Tuul võib ära viia |
| Katmine kattemembraaniga | Kestab kaua | Membraan on väga kallis Raske peale ja maha tõmmata |

Kuna külmade ilmadega on aunasegaja töö häiritud, siis on võimalik kasutada ka soojustatud õhuga sundõhustamist. See aitab kiirendada kompostiauna algfaasi temperatuuri tõusu ning hoiab ära auna mahajahtumise külmal perioodil. Samas on antud tehnoloogia väga energiakulukas ning sundõhutamine sooja õhuga ei garanteeri ühtlast temperatuuride jaotust aunas. [30]

1.6. Nõuded reoveesette käitlemiseks

Eestis reguleerib reoveesette käitlemist kaks määrust:

- Keskkonnaministri määrus nr 78 „Reoveesette põllumajanduses, haljastuses ja rekultiveerimisel kasutamise nõuded“ RTL 2003, 5, 48 [20];
- Keskkonnaministri määrus nr 24 „Reoveesetest toote valmistamise nõuded“ [32].

Mõlema ühine joon on, et reoveesette käitlemine peab tagama seda, et töödeldud sete ei kahjustaks tervist, keskkonda ega mulda, kuna sete võib sisaldada nii orgaanilisi toiteaineid kui ka reoaineid (nt raskemetallid, patogeenid ning lagunematud orgaanilised ühendid) [19]. Mõlemad määrused reguleerivad töödeldud sete omadusi ja kasutamist. Vastavalt määrusele nr 78 võib ainult stabiliseeritud või stabiliseeritud ja hügieniseeritud setet kasutada haljastuses, rekultiveerimisel või põllumajanduses lühikese raieringiga madalmetsa kasvatamisel. Põllumajanduses tohib setet kasutada ainult siis, kui sete on nii stabiliseeritud kui ka hügieniseeritud. Keskkonnaministri määrus nr 24 „Reoveesetest toote valmistamise nõuded“ on tunduvalt põhjalikum, sest esitab nõuded ka käitluskoha kohta. Need on [32]:

- Reoveesette käitluskoht peab olema ümbritestud piirdega, mis takistab kõrvaliste isikute ning loomade ligipääsu käitluskohale;
- Jäätmete ladustamisala, töötlemisala ning reoveesette kompostimis- ning hoistamisala peavad olema varustatud nõrgvee ning sademevee drenaažiga;
- Kõik alad peavad olema vettpidava pinnakattega, ning nendelt aladelt tekkiv sademe- ning võõrvesi tuleb kokku koguda ning puhastada;
- Jäätmete töötlemisala peab olema varustatud reoveesette käitlemise tehnoloogia kohase tehnikaga.

Samas tuleb ära märkida ka reoveesette töötlemisala lang. Kui plats on lauge või aunad on vales suunas valmis segatud võib juhtuda, et vihmase ilma korral on aunad hüdrauliliselt üksteisega seotud ning see võib kaasa tuua tõvestatud bakterite edasikandumise.

Lisaks sellele seab määrus nr 24 nõuded ka kompostimist puudutavate toimingute dokumenteerimiseks (nt käitlemise algus ja lõpp, käitlemisel mõõdetud temperatuurid ning mõõtmisajad, käitlemisel toimunud häired).

Järgnevalt on välja toodud mõlema määruse valguses settekompostiga seotud probleemid, nende piirnormid ning meetmed, kuidas neid lahendada.

Raskmetallid

Probleem: Metallide sisaldus reovees ja reoveesettes võib olla üle lubatud normi.

Nõuded [32]: Piirnormid (mg/ KA kg kohta) on järgnevad: plii (Pb) 130, kaadmium (Cd) 2, kroom (Cr) 60, vask (Cu) 200, nikkel (Ni) 40, elavhõbe (Hg) 1 ning tsink (Zn) 2500.

Meetmed probleemi lahendamiseks: reoveepuhasti ei saa otseselt mõjutada raskemetallide sisaldust. Kui on kahtlus, et vett reostab punktreostaja, siis tuleks jälgida sissevooluvee kvaliteeti, teha veeseiret, katsuda avastada raskemetallide allikas ning see lokaliseerida. Kui raskemetallide foon on piinormilähedane, tuleks jälgida, et tugiainetega ei antaks raskmetalle juurde.

Taimetoitained (N, P)

Probleem: lämmastiku ja fosfori sisaldus võib olla liiga madal, mis ei paelu tarbijat.

Nõuded: Väetavate omaduste alla kuuluvad kogulämmastik (N), kogufosfor (P) ning kaalium (K). Arvulisi väärtusi määrustes eraldi välja toodud ei ole, kuid komposti valmistaja peab tarbijale väetavate omaduste kohta käiva info edasi andma.

Meetmed probleemi lahendamiseks: Parandadada saaks reovee puhastamise käigus bioloogilist või keemilist N- ja P ärastust ning eksperimenteerida saaks toitaineterikkamate tugiainetega.

Komposti hügieenilisus

Probleem: Kompostis võib esineda salmonellabakter, *escheriachia coli*, helmintide munad.

Nõuded [32]: Salmonellabaktereid ei tohi olla 25 g kompostiproovis; *Escheriachia coli* peab jääma alla 10 PMÜ/1 g töödeldud sette märgkaalu kohta ning ühtegi helmintide muna ei tohi olla 10 g töödeldud sette märgkaalu kohta.

Meetmed probleemi lahendamiseks: Sette kompostimisel tuleb tagada piisavalt pikk aeg, kõrge temperatuur ning vähendada ilmastiku mõju, eriti talvel. Kompostimise kestus oleneb kompostitava materjali temperatuurist ning kompostimise meetodist [20]:

- kompostimisel aunades temperatuuril ≥ 55 °C vähemalt 10 d;
- kompostimisel aunades temperatuuril ≥ 65 °C vähemalt 3 d;
- kompostimisel reaktoris temperatuuril ≥ 60 °C vähemalt 3 d.

Vältida tuleks kompostiaunade hüdraulilist segunemist ning eelistada värke settega kompostimist. Temperatuuriseiresüsteem võiks töötada reaalajas, et anda operaatorile märku sellest, kui aunasid on vaja segada, niisutada või õhustada.

Komposti stabiilsus

Probleem: Liiga suur hapnikutarve kompostis, kõrge orgaanilise aine sisaldus, ebasobiv põletuskao ja kuivaine suhe, biogaasi jääkpotentsiaal liiga suur või lenduvate rasvhapete kontsentratsioon liiga kõrge. Toorevõitu komposti kasutamine põllumullas võib viia saagi ikaldumiseni.

Nõuded [20,32]: Hapnikutarve peab jääma alla 10 mg O²/g KA; orgaanilise aine sisaldus peab vähenema 38%; põletuskao ja kuivaine suhe (OA/KA) peab olema < 0,6; lenduvate rasvhapete kontsentratsioon < 0,43 g KHT/g OA või biogaasi jääkpotentsiaal < 0,25 l/g OA.

Meetmed probleemi lahendamiseks: Tagada tuleb kompostimiseks piisavalt pikk aeg ning kõrge temperatuur, vähendada tuleb ilmastiku mõju. Talvel tuleb aunad külmumise eest kinni katta või siis suuremaks kuhjates. Ka tugiainetega eksperimenteerimine võib olla abiks, sest mõne tugimaterjali lagunemisel tekib soojust (hobuse sõnnik).

Võõrised

Probleem: Kompostis võib esineda metalli, kive, mikroplasti või klaasi.

Nõuded [20]: Võõrised ei tohi olla üle 0,5% KA.

Meetmed probleemi lahendamiseks: Vältida tuleb jäätmekoodiga tugiainete kasutamist. Võõrised ja lagunemata tugiainet saab peale kompostimist vähemaks sõeluda.

Umbrohi

Probleem: Idanemisvõimelised umbrohuseemned ning tomatitaimed.

Nõuded: Ei tohi olla rohkem kui kaks seemet liitri komposti kohta.

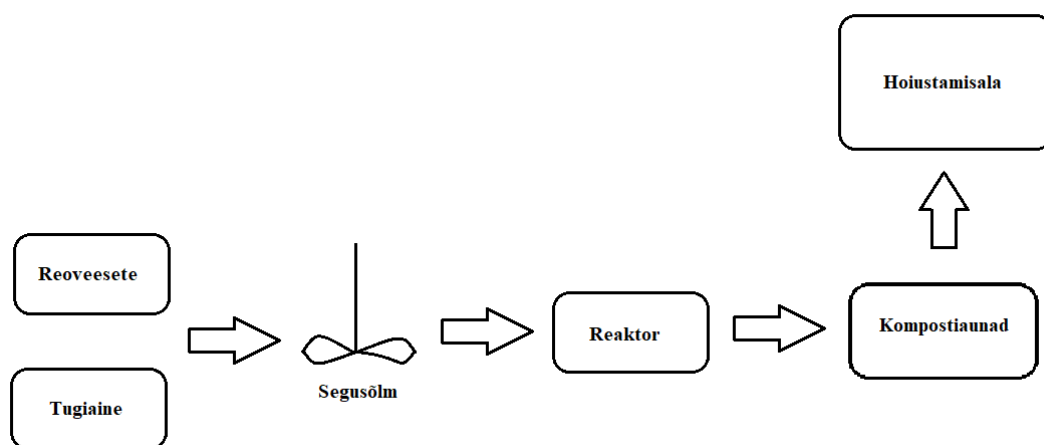
Meetmed probleemi lahendamiseks: Tagada tuleb piisavalt kõrge temperatuur kompostimisel. Valmiskompost tuleb kinni katta, et vältida seemnete tuulekannet.

Häiringud: hais

Probleem: Ammoniaak jms haisevad gaasid.

Nõuded: Nõuded puuduvad

Meetmed probleemi lahendamiseks: Kompostimise termofiilne faas tuleb läbi viia reaktoris, et seal haisev õhk kinni püüda ning puhastada haisubiofiltris (joonis 1.5). Vältida tuleb komposti ladustamist talvel ning eelistada tuleb värsket kompostimist.



Joonis 1.5. Haisuprobleemi vältimiseks mõeldud reoveesete käitlusviis.

Et haisuprobleem lahendada, tuleb sete segusõlmes tugiainega võimalikult peeneks purustada ja ära segada. Seejärel tuleb segu reaktoris hügieniseerida vastavalt määruses nr 78 esitatud punktile ($\geq 60\text{ °C}$ 3 ööpäeva jooksul). Reaktoris eemaldatakse hais, mis lahendab haisuprobleemi. Hügieniseeritud kompost pannakse aunadesse ning segatakse, kuni on saavutatud stabiilsus, seejärel viiakse valmis kompost hoiustamisalale, kus vahepeal komposti segatakse. Talvistes tingimustes tuleb valmiskomposti segamise asemel sundõhustada.

Häiringud: närilised, putukad, linnud

Probleem: Närilised ning putukad võivad edasi kanda haigusi.

Nõuded: Arvväärtusi ei ole, kuid närilisi, linde ja putukaid tuleb tõrjuda meetoditega, mis on ette nähtud reoveepuhasti enesekontrolliplaanis.

Meetmed probleemi lahendamiseks: Reoveepuhastid peavad antud probleemi korral laskma teha näriliste ning putukate tõrjet.

Tulekahju oht

Probleem: Tugiaine võib isesüttida. Liiga suurde hunnikusse kuhjatud kuiv settekompost võib isesüttida. Tulekahju võib puhkeda süütamise või tulega hooletu ümberkäimise tõttu. Sädemeid võib tulla mootoritest, rasketehnika heitgaasisüsteemist või laaduri koppa mööda asfaldi lohistades.

Nõuded: Arvväärtusi ei ole, tulekahjuohtu tuleb vähendada meetoditega, mis on ette nähtud reoveepuhasti enesekontrolliplaanis.

Meetmed probleemi lahendamiseks: Reoveepuhastid peavad seirama kompostiaunu liiga kuuma komposti avastamiseks. Olemas peab olema aasta läbi kasutatav veevõtusüsteem.

Käesoleva töö eesmärk oli uurida, kas ja millistel tingimustel on Eestis võimalik talvistes oludes reoveesetet aunkompostida nii, et see vastaks määruses nr 78 ja 24 nõuetele.

2. MATERJAL JA METOODIKA

2.1. Katsepaik

Magistritöö välikatsed viidi läbi AS Emajõe Veevärgi Elva reoveepuhasti asfalteeritud settetahendusväljakul. Elva reoveepuhasti on üheastmeline annuspuhasti hüdraulilise jõudlusega 1 600 m³/d (90 m³/h) ja reostuskoormusega 11 000 inimekvivalenti (ie). Settetahendusväljak, mille kogupindala on 2 500 m², on katuse all, kuid külgedelt avatud. Enne katsete läbiviimist puhastati ning valmistati settetahendusväljakul vajamineva suurusega plats.

2.2. Katse ülesehitus

Vajaminevad oskused kompostimise käigus kasutatud masinatega omandas autor Elva reoveepuhastis suvepraktikal ning tööl olles. Kõik lõputöös kasutatud kompostiaunad on autori poolt valmis tehtud ja hooldatud ning liikurseadmeid juhtis või opereeris autor ise. Tehti kaks katset, üks suvel-sügisel 2018 ja teine südatalvel 2019.

Sete

Katsesse võeti ainult Elva reoveesete ning välistati mujalt toodava sette sattumine katsesse. Muda tihendatakse antud puhastis raskustihendis, kus sette kuivainesisaldus tõuseb ligikaudu 2,5%-ni. Peale tihendamist tahendatakse reoveesete dekantertsentrifuugis, kus sette kuivainesisaldus tõuseb 20%-ni. Katsetes kasutatav sete oli värske ning toodi platsile käruga.

Tugimaterjal

Tugimaterjalina kasutati põhku, mis on Elva reoveepuhastis tavapäraselt kasutusel. Põhk oli rullides, varikatuse all, kuid külgedelt ilmastikule avatud. Katseks valiti võimalikult kuivad põhurullid, mis kaalusid 160–170 kg. Põhupalli maht on 1,4–1,5 m³. Kõik aunas olevad materjalid kas kaaluti või mõõdeti.

Teises katseseerias võeti ühe auna jaoks tugimaterjaliks haljastusjäätmed. Need saadi Elva linna haljastusjätmete kompostimisplatsilt. Peamiselt oli tegu sügiseste puulehtedega.

Katse 1

Esimene katse viidi läbi ajavahemikus 06.08.2018 kuni 20.11.2018. Selle katse eesmärgiks oli läbi teha kogu aunkompostimise tsüklil otsast lõpuni, et selgeks saada, kuidas kompostimine ettevõttes tavapärastest koostisosadest valmistatud kompost käitub soojal ajal. Esimese katse käigus tehti valmis üks aun, mõõtmetega 13 x 2 x 0,9 m. Sete segati tugimaterjaliga massi-vahekorras 10:1. Kokku läks selle auna tegemiseks 5 000 kg tahendatud reoveeset, mida lisati kolmes jaos, ning 500 kg põhku. Katse käigus lisati 800 liitrit vett. Niisutamise eesmärk oli auna turgutada kuumadel suvepäevadel, kui oli näha, et aun on kuivanud ning protsess hakkab seisma jääma.

Katse algas põhupalli lahti rullimisega, mis seejärel aeti aunapöörliiga (Backhus, 16.30, Saksamaa) kohevaks. Põhule lisati viis kopatäit reoveeset, igas kopas 250 kg setet (joonis 2.1). Seejärel segati põhk ning sete omavahel neli korda aunasegajaga edasi-tagasi sõites läbi. Kuiv põhk ja tihendatud reoveesete ei tahtnud hästi omavahel seguneda, mistõttu mitu korda läbisegamist on soovitatav. Seejärel lisati uus rull põhku ning taas viis kopatäit reoveeset, segati uuesti neli korda edasi-tagasi sõites läbi. Segamismehhanism seadistati tööle aeglastel pööretel, mis tagas, et sete ja põhk omavahel paremini seguneksid. Aun jagati keskelt mõtteliselt kaheks, üks pool kaeti geotekstiiliga ning teine pool aunast jäeti lahtiseks (joonis 2.2). Nii sooviti võrrelda, kas auna katmine mõjutab tulemusi.



Joonis 2.1. Reoveesette lisamine põhule.



Joonis 2.2. Kaetud ja katmata aun.

Järgmisel päeval lisati aunale veel üks põhurull. Põhku lisati järk-järgult põhjusel, et segamine ajab põhu kohevaks ning aun muutub segamisseadme jaoks liiga kõrgeks. Peale auna vajumist oli võimalik lisada põhku juurde.

30.08.2018 lisati aunale 400 liitrit vett, kuna aun oli hakanud kuivama ning ei püsinud enam hästi koos. Vett saadi survepesu paakautost, mis täideti Elva reoveepuhasti ligidal paiknevast hüdrandist puhta veega. Kogused mõõdeti veearvestiga. Teist korda lisati uuesti 400 liitrit vett 19.09.2018.

03.10.2018 lisati kompostaunale juurde viis kopatäit reoveesetet. Selleks ajaks oli näha, et protsess aunas oli seisma jäämas ning värske sette lisamisega püüti kompostimist taas käivitada. Peale sette lisamist segati aun kolm korda edasi-tagasi läbi. Uuesti lisati sama

kogus setet 07.11.2018 ning aun segati kolm korda edasi-tagasi sõites läbi. Setet lisati taaskord põhjusel kui aunas oli protsess seisma jäämas. Novembris olid juba esimesed külmad ning aunapöörel ei seganud enam külmade ilmade tõttu piisavalt hästi, kuna oli muutus masinas paksuks ega lasknud pöörilil enam nii hästi liikuda. 20.11.2018 järelitati, et aun on stabiliseerunud ning enam seda ei segata ning katse lõpetatakse. Geotekstiil eemalitati ning aun lükati järelvalmimiseks kokku kõrgemasse hunnikusse.

Katse 2

Teine katse algas 24.01.2019 ning lõppes 24.03.2019. Värske sete, katseks vajaminevad põhurullid ning haljastusjäätmekaaluti. Valmistati neli auna, kõik erineva koostisega (tabel 2.1).

Tabel 2.1. Teise katse aunad

| Aunad | Tugiaine (kg) | Reoveesete (kg) | Tugiaine/sete | Kinni katmine/soojustamine |
|--------------|---|-----------------|---------------|-------------------------------|
| Aun 1 | Põhk, 160 | 2 500 | 1:15 | Põhukiht 20 cm ja geotekstiil |
| Aun 2 | Põhk, 160; kompostilisand esimesest katsest 400 | 2 500 | 1:4 | Põhukiht 20 cm ja geotekstiil |
| Aun 3 | Puudub | 2 500 | - | Ei kaetud kinni* |
| Aun 3 | Haljastusjäätmekaaluti, 300 | 2 500 | 1:8 | Põhukiht 20 cm ja geotekstiil |

Märkus. Tähis „*“ jälgendab tavapärasest talvist olukorda RVP-s.

Esimese aunana (aun 1) tehti valmis esimeses katses oleva auna koopia. Kokku läks auna valmistamiseks üks põhurull kaaluga 160 kg ning reoveesete kogukaaluga 2 500 kg (1:15). Auna kokku segamine käis nagu esimeses katses, kõigepealt rulliti lahti põhupall ning see aeti aunasegajaga kohevaks, põhule lisati viis kopa täit reoveesetet. Peale seda segati komponendid neli korda edasi-tagasi sõites läbi ning lisati uuesti viis kopatäit setet. Peale seda segati aun kuus korda edasi-tagasi läbi, tõsteti kõrgemasse hunnikusse kokku ning kaeti soojustuse hoidmiseks min 200 mm põhukihiga ja seejärel kaeti omakorda geotekstiiliga.

Teine aun (aun 2) valmistati 160 kg põhust, 2 500 kg reoveesetest ning sellele lisati 400 kg esimesest katsest pärit kompostilisand. Valmiskomposti lisati selleks, et tuua sisse kompostimisega kohanenud mikroorganisme ning suurendada peenfraktsiooni osakaalu, sh

eripinda. Kõigepealt rulliti põhupall lahti, aeti aunasegajaga kohevaks, lisati viis kopatäit reoveesetet. See segati neli korda edasi-tagasi läbi ning viimaseks lisati 400 kg stabiliseerunud setet. Komponendid segati kuus korda edasi-tagasi läbi ning tõugati hunnikusse. Aun kaeti samamoodi nagu esimene aun, kõige pealt põhuga ning seejärel geotekstiiliga.

Kolmandale aunale (aun 3) tugimaterjali ei pandud, et imiteerida paljudes puhastites talvel toimuvaid olusid ning vaadata kuidas reoveesete talvistes oludes käitub. Seda auna kinni ei kaetud.

Neljas aun (aun 4) valmistati mõned päevad hiljem, 31.01.2019. Peamine põhjus seisnes selles, et külmade ilmade tõttu aunasegaja ei käivitanud. Neljandasse auna lisati naabruses asuvalt Elva haljastujäätmete kompostimisplatsilt saadud haljastujäätmed. Kõigepealt aeti laiali põhk, seejärel lisati reoveesete. Komponendid segati neli korda edasi-tagasi läbi. Viimaseks lisati haljastusjäätmed ning seejärel segati kõik kuus korda edasi-tagasi läbi. Valmis aun lükati koonusekujulisse hunnikusse, kaeti põhu ja geotekstiiliga.

Teise katsekäigu jooksul valmis tehtud aunasid hiljem enam mehaaniliselt läbi ei segatud.

2.3. Mõõteriistad

Katse jaoks vajalikud reoveesete ning haljastusjäätmed kaaluti „UWE AFW“ mõõtmistäpsusega $\pm 0,05$ kg ning põhk kaaluti „Excell PW 3 000“ kaalutaladega (125 x 12 cm). Maksimaalne mõõteulatus 1 500 kg ja mõõtetäpsus 500 g. Põhurullid tõsteti talakaalule AS Emajõe Veevärgi kopplaaduriga. Reoveesete ning haljastusjäätmed mõõdeti mahumeetodil. Reoveesetet tõsteti laaduri kopaga, mis mahutas keskmiselt 250 kg setet. Hiljem kaaluti haljastusjäätmed väiksema kastiga, mille maht oli 70 liitrit ja mass 20 kg. See annab mahumassiks $0,28 \text{ m}^3/\text{t}$.

Katsekehade temperatuuri mõõdeti nii pisteliselt käsitsi kui ka automaatselt reaaliajas. Käsitsi mõõtmiseks kasutati termomeetrit „Evikon E6015“ pikkusega 1,0 m, mõõteulatusega -60 kuni +550°C ja mõõtetäpsusega temperatuuri vahemikus -50 kuni +50°C oli $\pm 0,6^\circ\text{C}$ ning vahemikus +50 kuni +100°C oli $\pm 1,0^\circ\text{C}$. Käsitsi mõõdeti selleks, et kontrollida, kas automaatmõõteriistad on töökorras ning selleks, et saada lugem ka teistest kohtadest kui

püsiandurite paigast. Automaatseks mõõtmiseks komplekteeris Morten Poolakese Eesti Maaülikooli Veemajanduse osakonnas internetti ühendatava mõõtesüsteemi (joonis 2.3).



Joonis 2.3. Automaatne temperatuurimõõtesüsteem.

Temperatuuri mõõtmiseks reaalajas oli vaja kompostimisplatsile luua internetiühendus ning tuua elekter. Temperatuurisensorid kinnitati nelja nummerdatud juhtvarda külge kahel tasandil, 10 cm kõrgusele ning teine andur 80 cm kõrgusele maapinnast. Juhtvardad eemaldati iga segamiskorra eel ning peale seda pisteti tagasi auna ning suruti maani. Varras võimaldas andurid panna iga kord samale mõõtmistasemele. Temperatuuriandurid olid K-tüüpi termopaarid (Velleman), mille mõõteulatus on -50 °C kuni 200 °C.

Aunades tekkivaid gaase mõõdeti „Geotech GA5000“ (QED Environmental Systems, Inglismaa) analüsaatoriga, mis võimaldas mõõta metaani (CH₄), süsihappegaasi (CO₂), hapniku (O₂), amoniaaki (NH₃), vesiniksulfiidi (H₂S). Gaaside mõõtepiirkond on toodud tabelis 2.2.

Tabel 2.2. Gaaside mõõtepiirkond ja täpsus [34]

| | Mõõtepiirkond | Täpsus |
|--|----------------------|---------------|
| Metaan (CH₄) | 0–100 % | ±0,5 % |
| Süsihappegaas (CO₂) | 0–100 % | ±0,5 % |
| Hapnik (O₂) | 0–25 % | ±1,0 % |
| Amoniaak (NH₃) | 0–1000 ppm | ±10,0 % |
| Vesiniksulfiid (H₂S) | 0–200 ppm | ±2,0 % |

Õhuniiskust ning õhutemperatuuri mõõdeti arvuti külge ühendatud anduritega.

2.4. Mõõtmisrežiim ja proovivõtt

Gaasid

Gaaside koostise mõõtmiseks tuli gaas esmalt koguda. Selleks süvistati auna sisse lehtrid (läbimõõt 12,5 cm, maht 327 cm³), millest toodi auna pinnale voolikud läbimõõduga 0,8 cm. Lehtri suu kaeti võrguga, et nad ära ei ummistuks. Lehtrid pandi auna harja iga mõõtevarda juurde 80 cm kõrgusele maapinnast. Voolikud valiti sellise pikkusega, et ulatuksid auna jalamini (joonis 2.4).



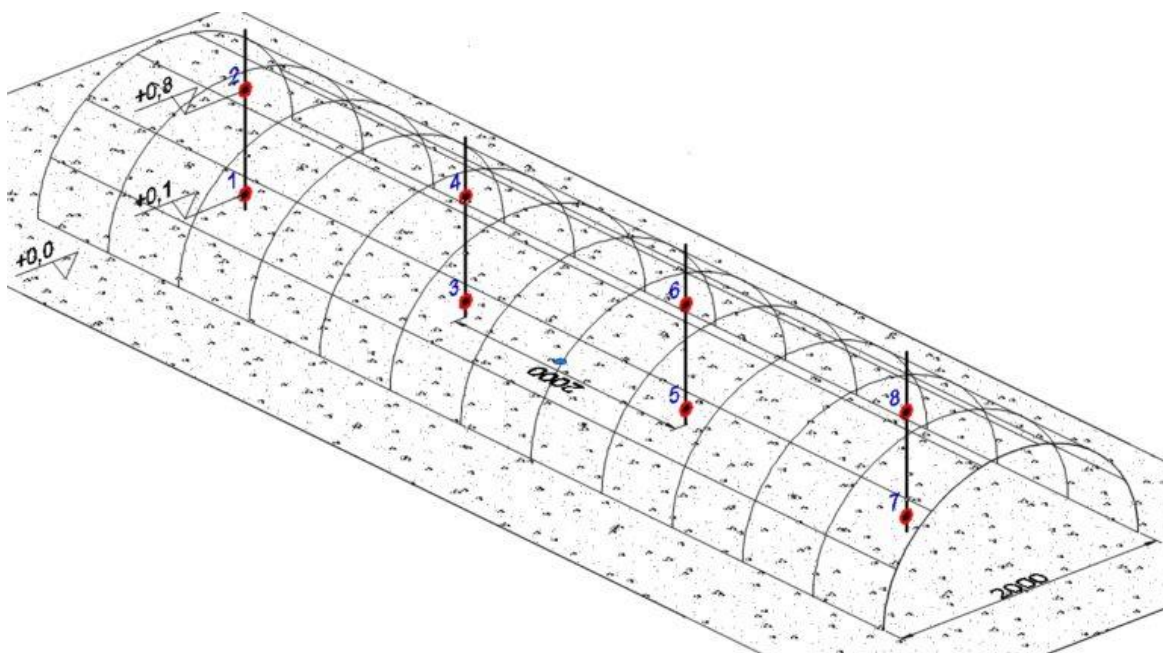
Joonis 2.4. Gaaside mõõtmise tarvikud.

Esimese katse algfaasis 15 päeva jooksul mõõdeti gaaside koostist kaks kuni kolm korda päevas, hommikul kell 8:30, lõuna ajal kell 12:30 ning õhtul 15:30. Katse hilisemas faasis mõõdeti gaaside koostist tavaliselt enne ja pärast aunade läbisegamist või kui aunasid segada vaja ei olnud, siis üks kord päevas, lõuna ajal. Kõik tegevused ja mõõtmistulemused märgiti logiraamatusse. Gaaside mõõtmiseks ühendati portatiivne gaasianalüsaator aunast välja ulatuva voolikuga. Imivoolikul oli küljes filter, mis takistas kondensatsiooniveel analüsaatorisse minemast. Mõõtmine kestis iga punkti juures vähemalt kaks minutit, kuni analüsaatori näidud stabiliseerusid. Teise katse käigus mõõdeti gaase ainult kolmest aunast:

aun 1, aun 2 ning aun 4. Kuna aun 3 oli koosnes ainult reoveesetest ning selle temperatuur ei näidanud vähimatki märki bioloogiliset elutegevusest, siis sellest gaase ei mõõdetud.

Temperatuur

Temperatuuri mõõtmise jaoks pandi aunadesse neli juhtvarrast kokku kaheksa anduriga (joonis 2.5).



Joonis 2.5. Temperatuuri mõõtmise skeem.

Enne auna segamist korjati juhtvardad välja ning peale segamist paigutati vardad tagasi auna. Juhtvardad paigutati auna kahemeetrise vahega. Kaks varrast olid geodekstiiliga kaetud osa sees ning ülejäänud kaks ilma katteta osa sees. Katse alguses mõõdeti temperatuur pisteliselt ka käsitsi. Käsitsi mõõtmised toimusid seni kuni veevärgis loodi katsepaigani ulatuv internetiühendus. Mõõtmine toimus igakord kui mõõdeti lagugaase ning siis, kui aunasid segati. Kui internetiühendus olemas oli, mõõtmistelt saadud tulemused automaatselt excelisse ning excel joonistas reaajas valmis graafiku. Lugem võeti iga tunni tagant.

Termopildistamine

Talvise katse käigus tehti termokaameraga „FLIR B60“ mõõteulatusega -20°C kuni 120°C (joonis 2.6) termopildid, et vaadata kuidas soojus aunades jaguneb. Mõõtmised tehti aunast 2, mille tugimaterjalideks olid põhk ning valmiskompostilisand (joonis 2.7). Termopildiga mõõdistamised toimusid 07.03.2019, tööd algasid kell 09.05 ning tööde lõpp oli 09.40.

Välitemperatuur oli -2°C ning tuul oli 0-5 m/s. Piltide tegemiseks eemaldati aunalt üksteise järel geotekstiil ning põhk, seejärel lükati aun laaduriga keskelt pooleks, et avaneks värske ristlõige. Esimene pilt tehti aunadest, kui geotekstiil veel peal oli. Järgnev pilt tehti aunast kui riie oli eemaldatud. Uus pilt tehti siis kui põhk oli eemaldatud. Viimane pilt aunast tehti siis, kui näha oli terve auna läbilõige. Termokaamerat hoiti käes ning suunati auna keskkoha, et pilt teha. Pildid tehti erinevatest nurkadest.



Joonis 2.6. Termokaamera „FLIR B60“.



Joonis 2.7. Aunade asetus: aun 1; aun 2; aun 3 ja aun 4. Termopildistatav on aun 2. Välitemperatuur -2°C .

Proovid

Kompostiaunast võeti regulaarselt proove ning viidi EMU bio- ja keskkonnakeemia laborisse. Labori jaoks võeti proovid kõigist koostisainetest: põhust, reoveesetest, haljastusjäätmetest kui ka kokku segatud aunadest. Iga katse alguses võeti proovid ning edaspidi tuli võtta proov kui aunadele lisati juurde setet. Esimene proov võeti 06.07.2018, proovid võeti tugiaimest, reoveesetest kui ka kokku segatud aunast. Teine proov võeti 23.08.2018 katte all olevast aunast ning katteta aunast. Kolmas proov võeti 03.10.2018 katteta aunast ning kattega aunast ja peale reoveesette lisamist kogu aunast. Neljas proov võeti 14.11.2018 katteta ja kattega auna pooltest. Teise katse käigus võeti ainult üks kord proov, 24.01.2019 kohe kui katsekehad valmis segati. Igast aunast võeti eraldi tugiainetest proov ning ka kokku segatud aunadest. Proovid võeti auna tuumast erinevatest kohtadest osaproovidena, mis segati ühendprooviks. Proove transporditi prügikottides, mis olid õhukindlalt suletud.

Proovidest määrati kuivainesisaldust (KA) ning orgaanilise aine koostist (OA). Kuivainesisaldus leiti kuumutades proovi 105 °C juures 24 tundi, orgaanilise aine sisaldus määrati põletuskaona, kuumutades proovi neli tundi 550 °C juures.

Proovidest määratud kuivainesisalduse ning orgaanilise aine kaudu arvutas Tust (2019) enda magistritöö käigus välja stabiilsuse näitajad ning võrdles neid määruses [32] esitatud piirväärtustele. Reoveesette stabiilsus leiti hapnikutarve, orgaanilise aine sisalduse ning põletuskaod ja kuivaine suhte kaudu. [43] Autori töö oli ühendada komposti kulgemist stabiilsusega ning kompostimistehnoloogia ühildada stabiilsuse saavutamiseks. Käesolevas töös on kompostimisprotsessi kulgemine (lagugaasid, temperatuur) ühendatud stabiilsusega, mille teadmine annaks reoveepuhasti operaatorile võimaluse optimeerida kompostimist sellisel viisil, et kiirendada protsessi stabiliseerumist.

2.5. Küsitlus reoveepuhastites

Autor külastas nelja reoveepuhastit (Elva, Võru, Paide ning Kohtla-Järve), kus viis läbi küsitluse, et selgusele jõuda, kas antud reoveepuhastid vastavad reoveesette jäätimestaotuse lakkamiseks vajalikele nõuetele. Küsitlused koostati vastavalt keskkonnaministri määrustele nr 24 „Reoveesetest toote valmistamise nõuded“ ning nr 78 „Reoveesette põllumajanduses,

haljastuses ja rekultiveerimisel kasutamise nõuded“. Küsitlus oli koostatud kontoritarkvaradesse MS Excel ja MS Word. Küsitlused on Lisas 1 ja 2. Küsitlustest saadud tulemuste põhjal koostati kaks tabelit, kus võrreldi iga puhasti kohta saadud andmeid. Tabelid on esitatud Lisas 3 ja 4. Tulemuste põhjal selgitati välja, millistele puhastitele on vaja investeeringuid järgmiste punktide osas:

- Ehitus;
- Seadmete uuendus;
- Tehnoloogia uuendus;
- Dokumenteerimine.

Antud puhastid osutusid valituks, kuna Maaülikoolis toimus samade puhastite kohta rakendusuuring. Peamised aspektid, mis osutusid määravaks olid, et Emajõe Veevärgi Elva reoveepuhasti on hea näide regionaalsest settekäitluskeskusest, kuhu tuuakse kokku mitmete väikeste puhastite sete, mida ettevõtte haldab, Paide ja Võru osutusid valituks, kuna on keskmise suurusega linnad. Kohtla-Järve on hea näide suurest reoveepuhastist, mis on tööstusreovee mõjuga. Kõik neli puhastit on SBR tüüpi annuspuhastid. Esimeses küsitluses, mis viidi läbi kontoritarkvara MS Word abil, olid küsimused määruses nr 24 esitatud nõuete kohta (dokumenteerimine, käitluskoha info jne). Teises küsitluses uuriti reoveepuhastite tehnilist tausta (kuidas käideldakse setet, millised on sette parameetrid jne).

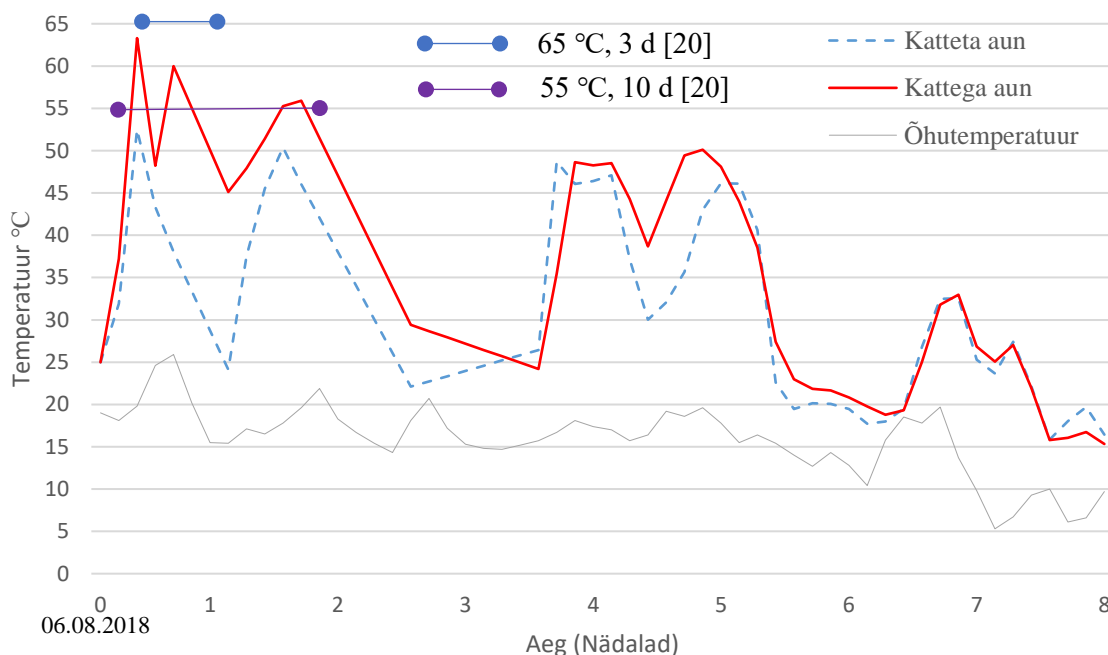
3. TULEMUSED JA ARUTELU

3.1. Esimene kompostimiskatse

3.1.1. Temperatuur

Kompostimise kulgu iseloomustab temperatuur. Esimest korda mõõdeti temperatuure aunas katse alguse päeval 06.08.2018. Mõõtmised tehti alguses käsitsi, iga juhtposti juures auna põhjast ning samuti mõõdeti ka põhu ning reoveesette temperatuur: põhupallis 35,5 °C ning reoveesettes 24,3 °C (mõõtmised tehti varjus).

Nii lahtise kui ka katte all oleva auna temperatuurid hakkasid katse alguses kiiresti tõusma. Selgelt oli näha, et katte all oleva auna temperatuur saavutas kiiremini parema tulemuse (joonis 3.1).

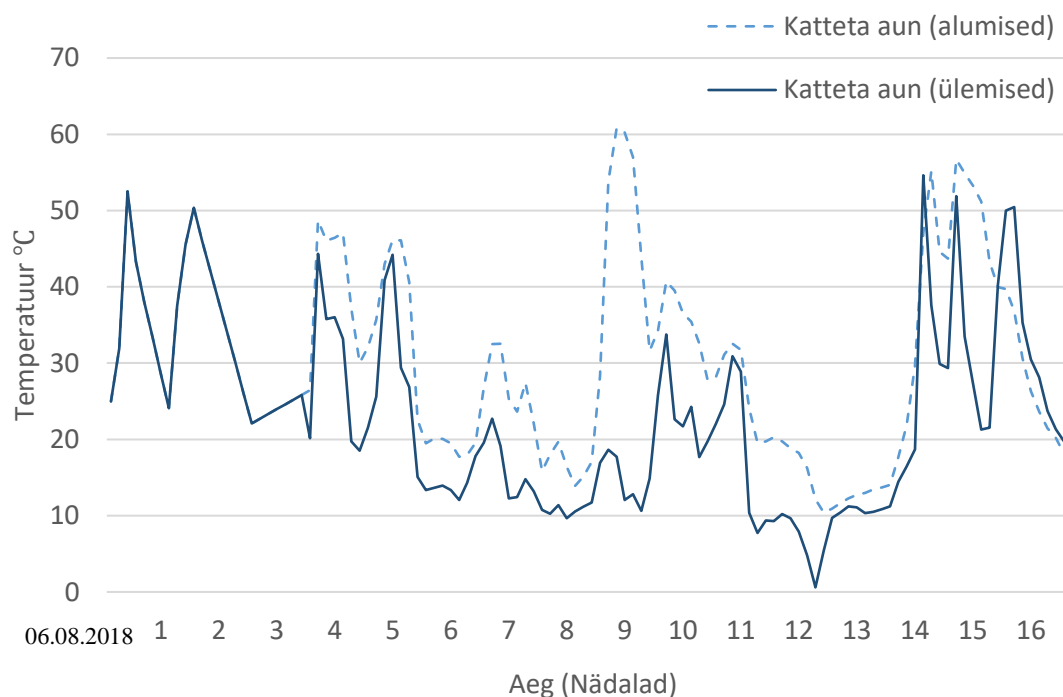


Joonis 3.1. Kattega ja katteta auna keskmised temperatuurid [20].

Paari päeva möödudes peale katse algust olid temperatuurid auna kattealuses osas jõudnud juba üle 60 °C-ni, ilma katteta auna osas samal ajal napilt üle 50 °C-ni. Temperatuur hakkas

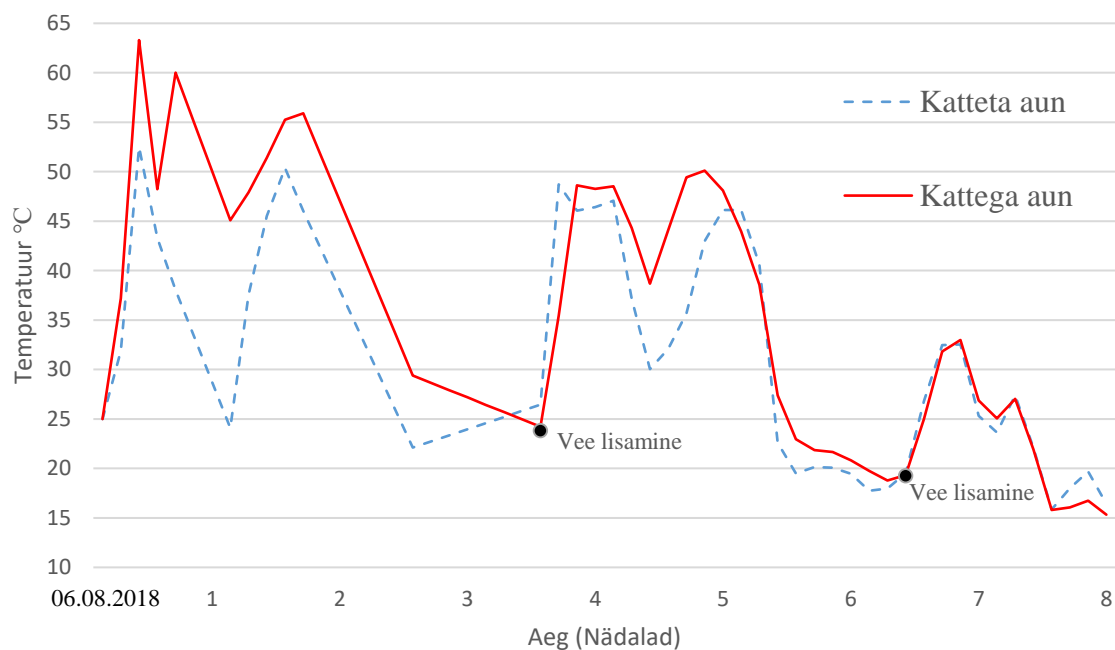
peale neljandat päeva langema. Põhjuseks võib olla ilmastiku jahutav mõju (tuul) ning olud, mis muutusid mikroorganismidele ebasoodsaks (niiskuse ebaühtlane jaotumine, lagugaaside akumulatsioon kompostis, hapnikupuudus, kompostitava massi struktuuri muutumine vms). Määruses [20] ette nähtud temperatuure ei suudetud tõendada, kuid neile oldi lähedal (joonis 3.1). Kindlasti on ainet saavutada 55 °C 10 päeva jooksul, kuid selleks tuleb kompostimist optimeerida ning vähendada vigu (hapnikupuudus, jahtumine tuule toime), mis on operaatori pädevuses. Sel perioodil tuleb temperatuuri jälgida reaajajas, sest vaid nii saab infot kompostimishäiringute kohta.

Suurenenud süsihappegaasi sisaldus (katteta aunas 1,3% ja kattealuses osas 4,1%) ning vähenenud hapnikusisaldus (katteta auna osas 19,8% ja kattealuses osas 16,3%) näitab, et katte all oli bakterite elutegevus aktiivsem ning kompostimist tuleks bakterite vajaduste järelle optimeerida. Katsetama peaks kombinatsiooni auna läbisegamisest ja pneumaatilisest õhustamisest. Temperatuurilugemid auna alumistes punktides ja ülemistes punktides erinesid mõnevõrra. Sügavamal olid temperatuurid kõrgemad, kui ülemistes mõõtepunktides, mis näitab ilmastiku mõju komposti pinnakihi (joonis 3.2).



Joonis 3.2. Katteta auna osa alumiste ja ülemiste punktide võrdlus.

Katse 18-ndal päeval oli näha, et kompostimine hakkab seisma jääma (joonis 3.2), kuna mõõdetud temperatuurid jäid kogu kompostiauna piires 20 °C piiresse. Põhjuseks oli see, et kompost oli ära kuivamas, sellepärast otsustati lisada vett, et kompostimine uuesti käima panna. Esimest korda lisati vett 30.08.18. Sellest oli kohe kasu, sest temperatuurid tõusid kahe päeva jooksul taas üle 50 °C. Teist korda lisati vett 19.09.2018, sest aunas olid temperatuuri 13–20 °C vahel. Peale kastmist tõusid temperatuurid, kuid vaid napilt üle 30 °C ning sealt edasi hakkas jälle langema (joonis 3.3). Ehkki reoveesette kompostimisel on tavaliselt probleemiks liialt niiske reoveesete, siis kompostimise käigus veesisaldus väheneb aurumise ja liigvee välja nõrgumise tõttu ning kompost muutub liiga kuivaks. Sel juhul tuleb lisada vett, kuid alternatiiviks on ka uue portsu niiske reoveesete lisamine. Sette lisamisega tuleb olla ettevaatlik, sest kui kompost on muutunud hügieeniliseks, siis uue portsu reoveesete lisamine toob komposti hulka mikrobioloogilise reostuse ning auna on vaja uuesti hügieniseerida. Kui lisatakse puhast vett, siis seda ohtu ei ole.

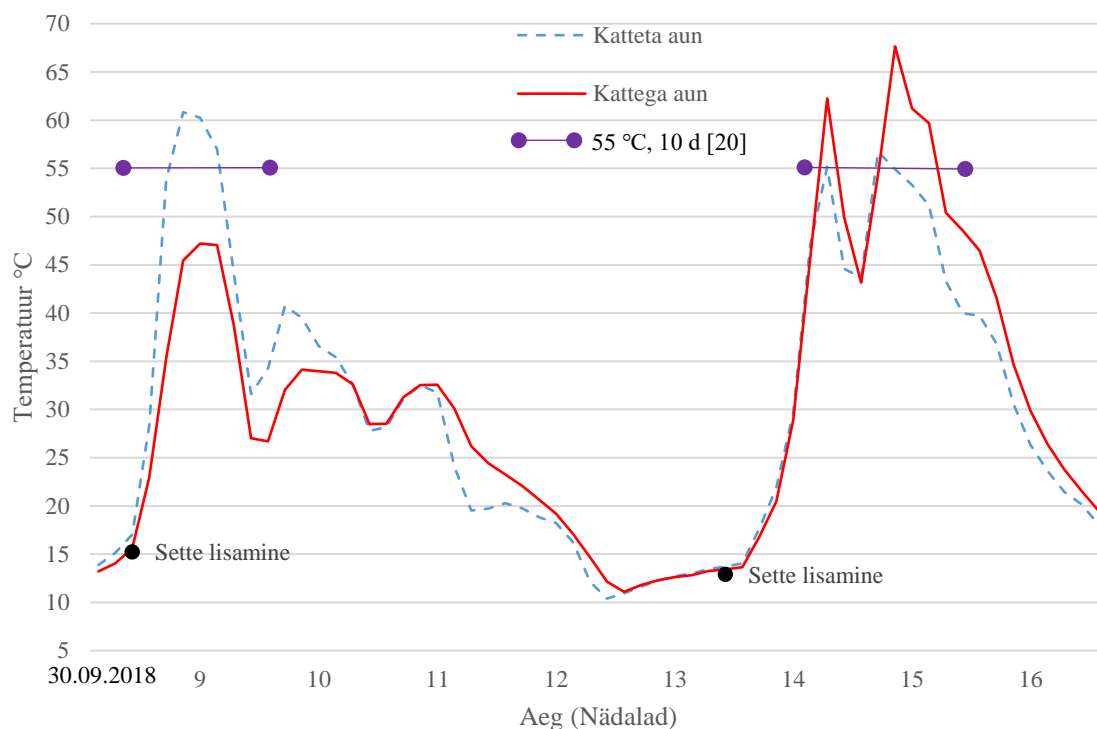


Joonis 3.3. Vee lisamise mõju.

03.10.2018 lisati aunale värsket reoveesetet. Sette lisamine andis protsessile omakorda niiskust ja kergelt lagunevat orgaanikat juurde ning paari päeva möödudes olid temperatuurid juba natukene üle 60 °C. See osutab ka sellele, et kompostimistehnoloogiat valides võiks kaaluda sette lisamist portsude kaupa, et hoida kogu aun võimalikult aktiivne.

Eelise võiks see anda just sügisel vastu talve, kui on vaja pikendada aktiivset kompostimist. Silmas tuleb pidada, et sette ja tugiaine vahetamine ei läheks ebasoodsaks ning sette lisamine ei läheks vastuollu hügieeni- ega stabiliseerimis põhimõtetega.

Viimast korda lisati setet samale aunale 07.11.2018 kuna temperatuurid olid jälle väga madalad. Sette lisamine tõstis auna temperatuuri paari päeva möödudes kattega auna osas üle 60 °C ning katteta auna osas 55 °C juurde (joonis 3.4). Määruses ette nähtud 55 °C ja 10 d ei saavutatud, kuid ette võetud tegevuste positiivne mõju on ilmne.

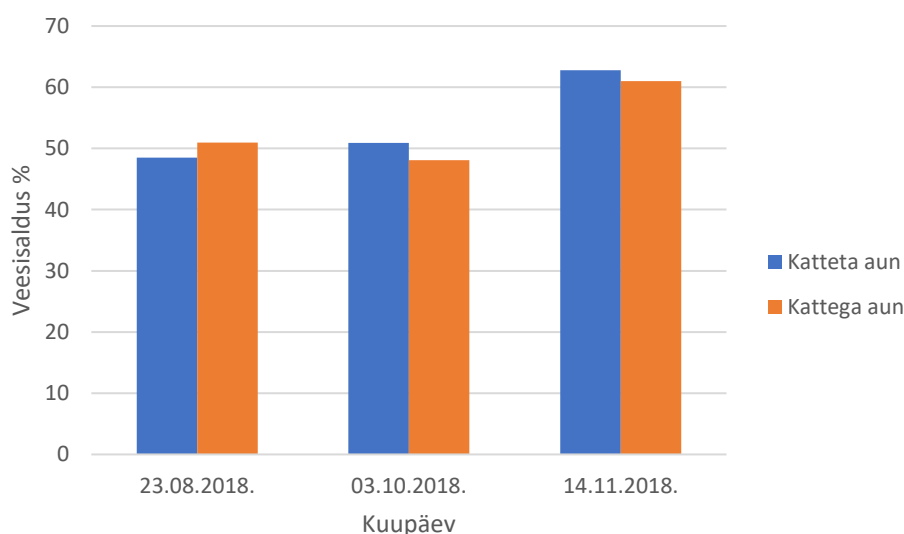


Joonis 3.4. Sette lisamine aunale [20].

Võrreldes temperatuure katteta ja kattega auna osas võib järeldada, et esimese kaheksa nädala jooksul andis parema tulemuse kattega auna pool, seda isegi tingimustes, kus kogu katse tehti katuse all. Hilisemas katse faasis nädalatel üheksa kuni kuusteist olid tulemused peaaegu võrdsed, välja arvatud sette lisamise tingimustel. Katmine aitab pigem auna hügieeniseerimisele kaasa, seega aunasid ei ole vaja katta mitte kogu kompostimisajaks, vaid esimesteks nädalateks. Tulemused võivad olla teised, kui kogu kompostimine toimub lahtise taeva all või kui aunad on tunduvalt suuremad.

Tulemustest selgus, et vastupidiselt oodatule geotekstiiliga kinni katmine olulist niiskuse erinevust aunas ei põhjustanud (joonis 3.5). Eeldati, et geotekstiil peaks auramist ära hoidma ning aunas niiskust hoidma. Põhjus võib olla ka selles, et proovid võeti iga kord peale aunade läbisegamist, mis ühtlustas niiskuse kogu auna lõikes. Niiskuse jagunemist kaetud ja katmata auna ristlõike ulatuses tasuks eraldi uurida.

Nagu jooniselt näha, siis 14.11.2018 on veesisaldus aunas kõrgem kui teistel joonisel näidatud päevadel. Selle võis põhjustada värske sette lisamine auna 07.11.2018.



Joonis 3.5. Niiskuse erinevus kattega ja katteta auna osas.

3.1.2. Lagugaasid

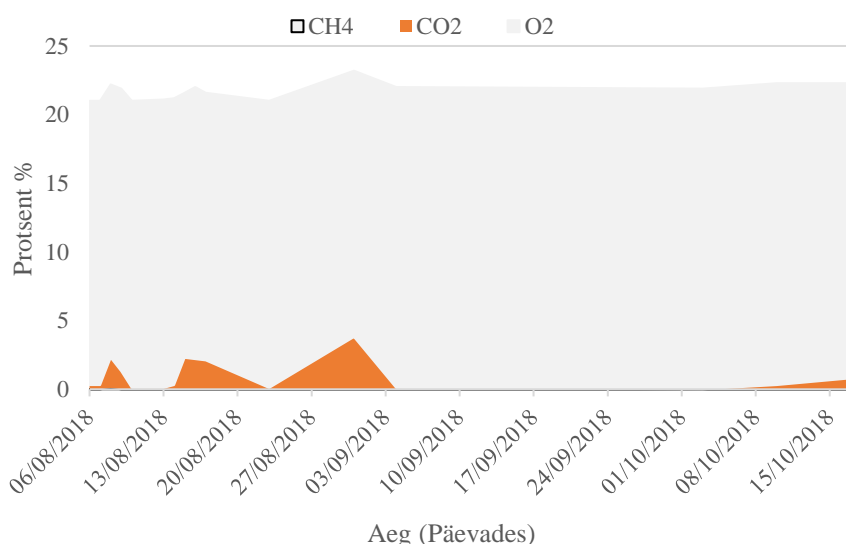
Kompostimise kulgemist iseloomustab hapniku ja süsihappegaasi sisaldus. Hapnikku on õhus ligikaudu 21% ning aunas hakkab see vähenema, sest mikroorganismid tarbivad hapnikku. Tekib süsihappegaas. Et kompostimine on aeroobne, ei tohiks metaani kunagi olla. Mõõtmistulemustest (tabel 3.1) võib täheldada, et kompostimise käigus metaani (CH_4) mõõdeti 0 ja 0,1% vahel nii katteta kui ka kattega auna osas. Sellest võib järeldada, et protsess oli aeroobne ning anaeroobset keskkonda ei tekkinud. Süsinikdioksiidi (CO_2) hulk varieerus kattega auna osas 0,1 ja 5,6% vahel. See näitab seda, et mikrobioloogiline elutegevus toimus ning 5,6% viitab aereerimise vajadusele. Katteta auna osas oli süsihappegaas vahemikus 0,1–3,8%. Kate hoidis gaase kinni. Mida suurem oli süsihappegaasi hulk, seda väiksem oli hapniku (O_2) sisaldus aunas. Kinni kaetud auna osas

oli hapnik vahemikus 15,4–21,9%. Lahtises aunas aga 18,1–21,9%. Seega loomulik õhustus toimis paremini katmata aunas. Operaatori ülesanne on otsustada, kas õhustamisest tulenev kasu kaalub üles temperatuurikaost tuleneva kahju.

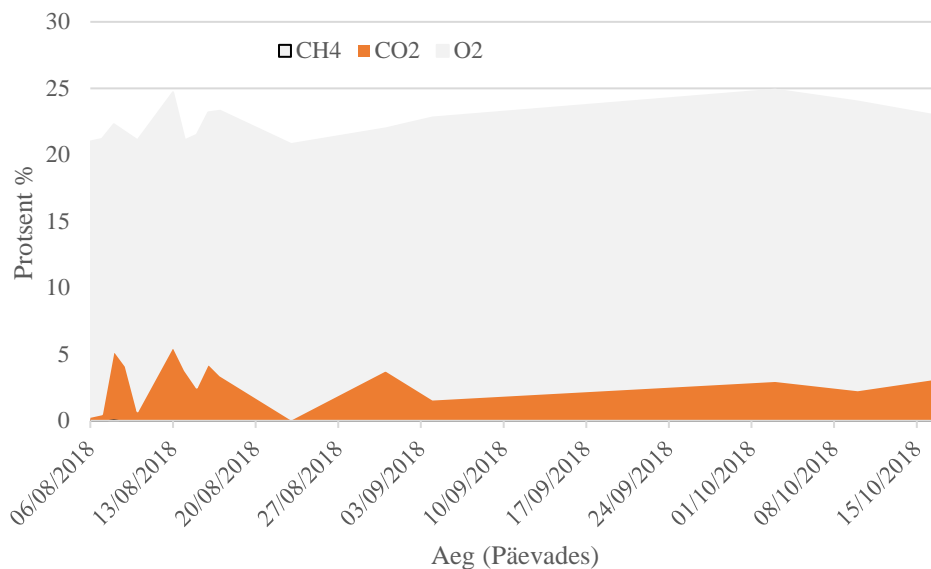
Tabel 3.1. Mõõdetud gaasid

| Gaasid | Ühik | Kattega auna osa | Katteta auna osa |
|-----------------------|-------|------------------|------------------|
| CH ₄ (%) | (%) | 0–0,1 | 0–0,1 |
| CO ₂ (%) | (%) | 0,1–5,6 | 0,1–3,8 |
| O ₂ (%) | (%) | 15,4–21,9 | 18,1–21,9 |
| NH ₃ (PPM) | (ppm) | 38–1000 | 7–1000 |
| H ₂ S | (ppm) | 0–16 | 0–8 |

Võib järeldada, et lahtine on paremini õhustatud kui kinnine aun, samas hapnikupuudust ei esinenud. Ammoniaak (NH₃) oli enamus mõõtmistel üle mõõtepiirkonna. Sellest ka ebameeldiv hais kompostimisel. Et ammoniaagi ja ammooniumisisaldus on pH ja temperatuurisõltuvuses (joonis 1.2), siis aitab kompostimise optimeerimine kaasa haisu vähendamisele. Kui vaja, tuleks kompostimise esimene faas panna õhukindlasse reaktorisse ning lagugaasid koguda ja puhastada. Vesiniksulfiidi (H₂S) hulk varieerus kattega aunas 0–16 ppm, lahtises aunas aga 0–8ppm. Kattega auna osa lagugaaside mõõtmistulemused on ära näidatud joonisel 3.6 ning katteta auna osa lagugaaside tulemused joonisel 3.7.



Joonis 3.6. Katte all oleva auna lagugaaside mõõtmistulemused kogu katse perioodil.

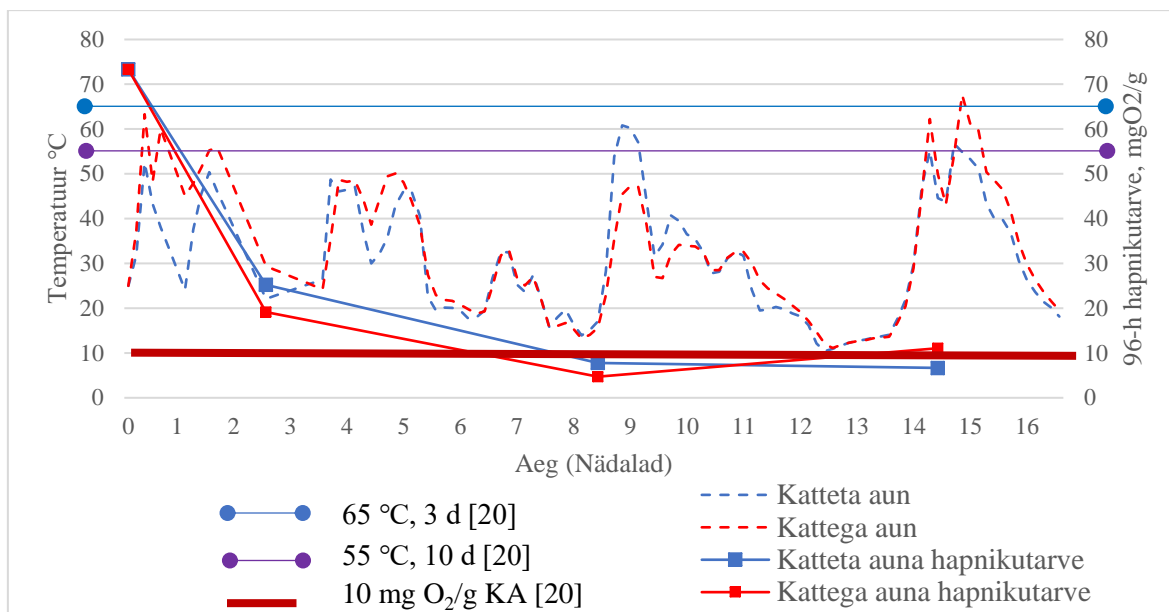


Joonis 3.7. Katteta auna osa lagugaaside mõõtmistulemused kogu katse perioodil.

3.1.3. Stabiilsus

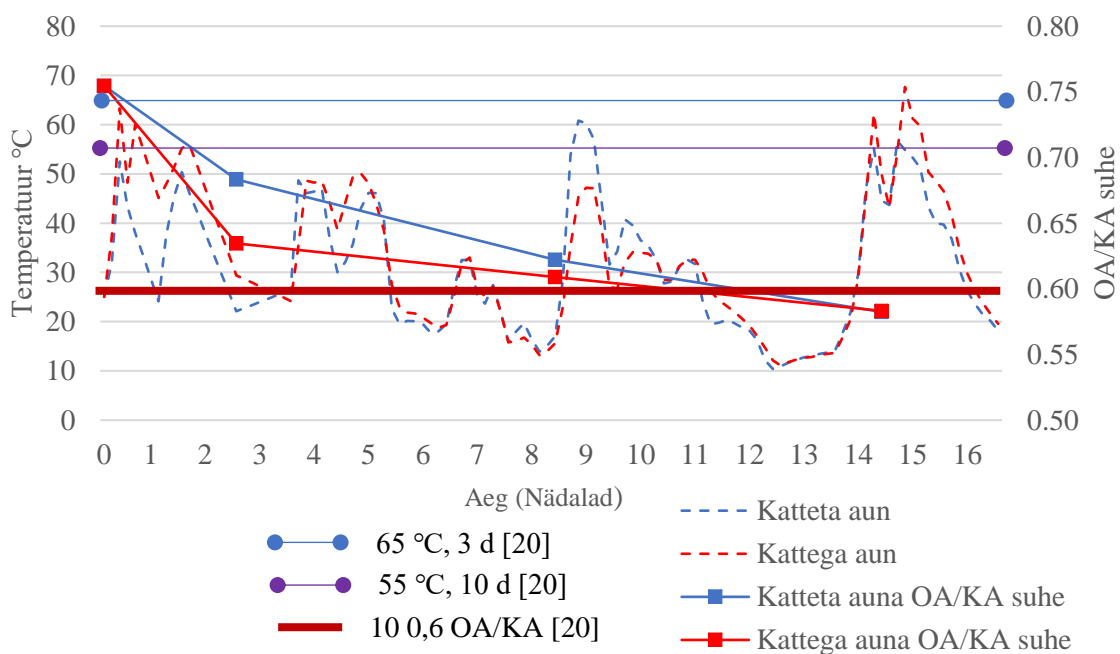
Komposti stabiilsuse on määranud Ingrid Tust [43] oma magistritöös, võrreldes seda määruses „Reoveesetest toote valmistamise nõuded“ lisas 2 esitatud hapnikutarve, orgaanilise aine sisalduse ning põletuskao ja kuivaine suhte piirmäära alusel.

Komposti katteta ja kattega auna osade proovide stabiilsus 96-tunnise hapnikutarbe mõõtmise alusel väga palju ei erinenud (joonis 3.8). Nii katteta kui ka kattega osas langeb hapniku tarbimine kiiresti ning mõne aja möödudes aeglustub. Kaheksanda nädala keskel hapnikutarve kattega auna osas natukene tõuseb, katteta osas hapnikutarve langus jätkub. Vastavalt määruses esitatud piirväärtusele 10 mg O₂/g KA, siis kattega auna osa saavutas stabiilsuse umbes kuuenda nädala keskel, kuid katteta auna osa kaheksanda nädala alguses. Seega on stabiilsuse saavutamiseks oluline just kompostimise algfaas. Hilisem sette lisamine stabiilsust enam ei mõjutanud, arvatavasti seetõttu, et kompostiaunas on välja kujunenud elujõuline miokroorganismikooslus, mis uue setteportsu suutis kiiresti stabiilseks muuta.



Joonis 3.8. Komposti stabiilsuse muutus ajas.

Lisaks vaadeldi ka stabiilsust orgaanilise aine (OA) ning kuivaine (KA) suhte järgi. Määruses nr 24 lisas 2 esitatud nõuetele peab stabiliseerunud komposti põletuskao ja kuivaine suhe jääma alla 0,6 OA³/KA (joonis 4.89). Joonisel 3.9 on piirväärtus ära märgitud tumepunase joonega.



Joonis 3.9. Komposti põletuskao ja kuivaine suhte muutus ajas.

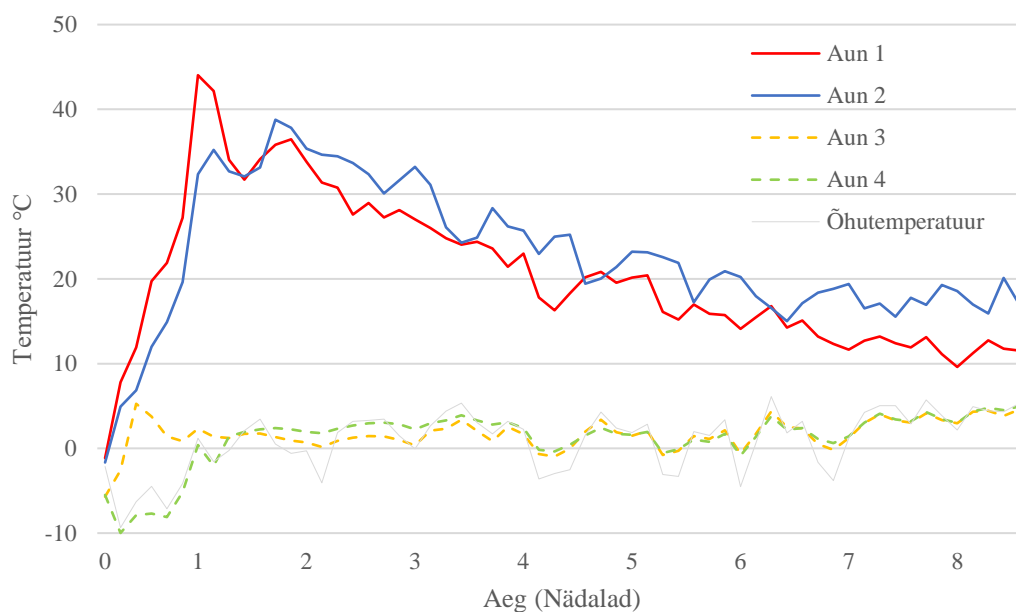
Antud tulemuste põhjal saavutas kattega auna osa stabiilsuse kümnenda nädala alguses ning katteta osa 11. nädalal.

3.2. Teine kompostimiskatse

3.2.1. Temperatuur

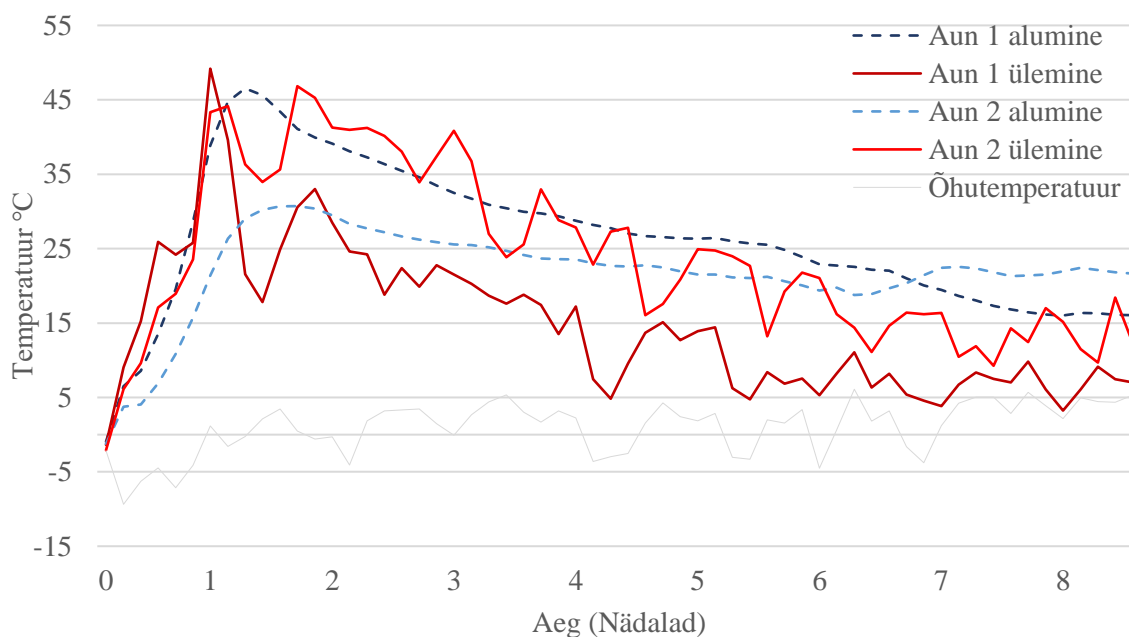
Teise katse temperatuurid olid reaajas kättesaadavad, kuna mõõtmissüsteem oli esimesest katsest veel töös.

Paar päeva peale katse algust oli võimalik aunad selgelt jagada kaheks: aunad, milles temperatuur tõusis ning aunad, kus temperatuur kõikus välistemperatuuri juures (joonis 3.10). Nimelt auna 1 (põhk ja sete) ning auna 2 (põhk, sete ja valmiskompostilisand) temperatuur tõusis järsult esimese katsenädala jooksul, hoolimata talve kõige külmemast ajast. Alates teisest nädalast hakkasid temperatuurid aeglaselt langema. Auna 3 ja 4 temperatuurid püsisid õhutemperatuuriga samal tasemel ning kõikusid samas suurusjärgus.



Joonis 3.10. Talvise katse aunade temperatuurid.

Tulemustest selgus, et isegi kui aunad on põhu ning geotekstiiliga kaetud, siis välimine kiht aunast on ilmastikust kõvasti mõjutatud (joonis 3.11).



Joonis 3.11. Auna 1 ja 2 ülemiste ning alumiste temperatuuride võrdlus.

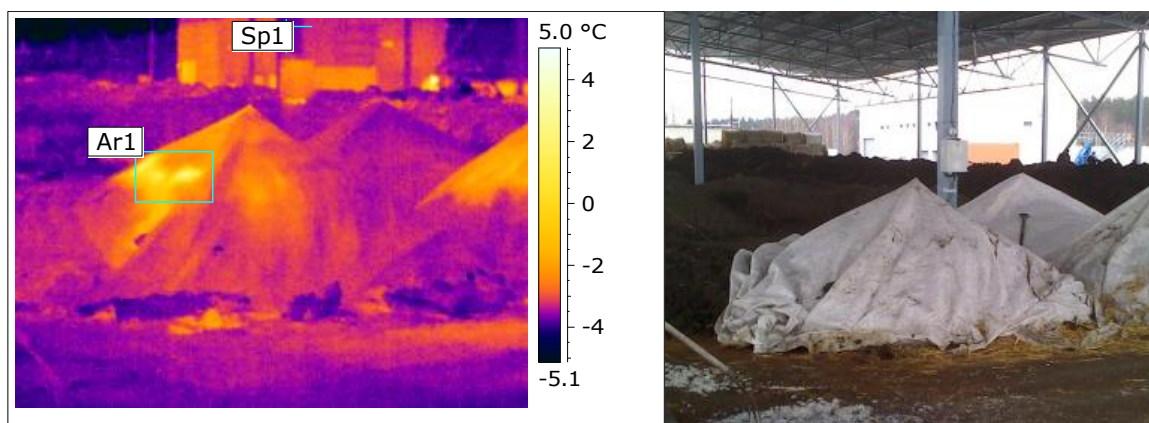
Jooniselt 3.11 võib välja lugeda, et mõõtevarde alumiste punktide temperatuurid on stabiilsemad ning ei kõigu nii palju kui ülemised. Sellest võib järeldada, et ilmastiku mõju põhjustas temperatuuride kõikumise aunade ülemistes osas.

Talvise katse ühegi auna temperatuur ei ulatunud määruses „Reoveesette põllumajanduses, haljastuses ja rekultiveerimisel kasutamise nõuded“ ette antud temperatuurideni (55 °C), kuid see võib olla tingitud katseaunade väikesest mahust. Temperatuuri järsk tõus miinuskraadide juures alustatud katse käigus näitab, et kompostimine võib ka talvel välja tulla. Kõige sobilikuma tulemuse saavutas aun 1 ning kõige ebasoodsam keskkond mikroorganismidele oli aunas 3 ja 4. Samas võib välja tuua, et haljastusjäätmel olid külmunud, mis võis põhjustada aunas ebasoodsad tingimused ning takistada aunas temperatuuri kasvu. Haljastusjätmete rolli reoveesette kooskompostimise korraldamisel tuleks uurida eraldi. Abi võiks olla lehtede purustamisest, kuivana hoidmisest ning värskemast biomassist kui seda olid sügisesed lehed.

14.02.2019 teostas autor käsitsi kontrollmõõtmise ning sai tulemusteks hoopis teised väärtused, mis reaajas mõõdetu näitas. Nimelt oli näiteks aunas 1 automaatselt mõõdetud tulemus 25,9 °C, aga kohapeal käsitsi mõõtes 50,5 °C. Samuti ka aunas 2 oli tulemus teine (automaatselt mõõdetud tulemus – 31,11, kuid käsitsi mõõtes 48,9 °C). Põhjuseks võib olla

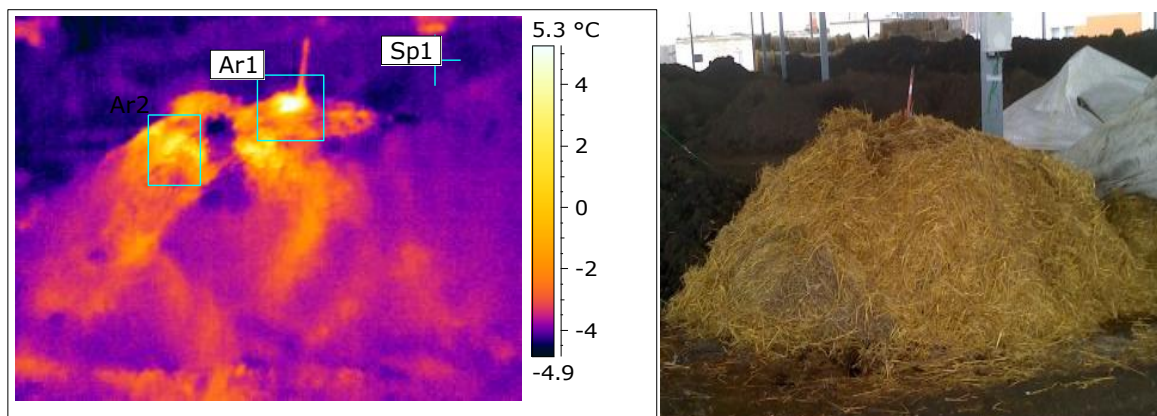
kuumade pesade moodustumine aunades, mida ei segatud. Paikne andur oli seega sattunud auna jahedamasse piirkonda. Selliseid anomaaliaid aitaks avastada termopildistamine.

Termopiltidest saadud andmete põhjal võib väita, et riidega katmine ja isolatsioonikiht (põhk 20 cm) aitavad auna temperatuuri hoida. Katteriide all oli temperatuur vahemikus 3,0–3,9 °C (joonis 3.12).



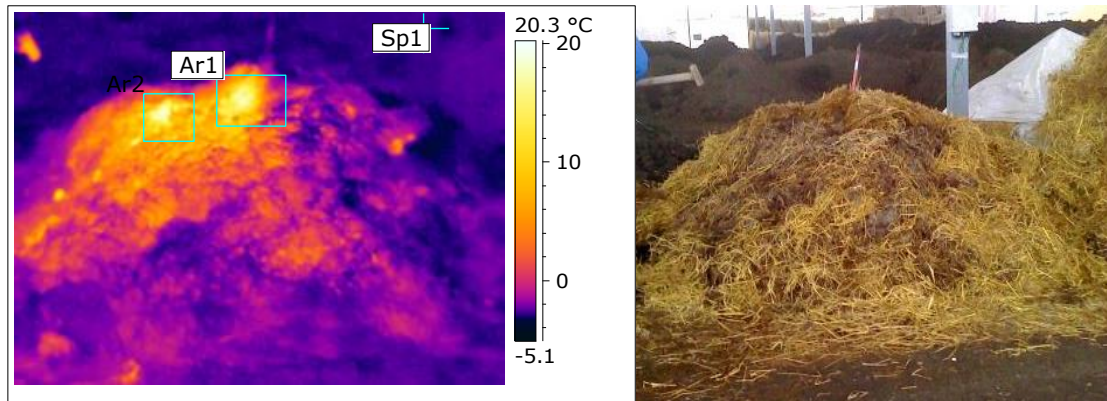
Joonis 3.12. Auna 2 temperatuur pildistatuna läbi katteriide ja isolatsioonikihi. Suurimad leitud temperatuurid AR1 on 3,0–3,9 °C.

Peale katteriide eemaldamist, umbes 20 cm isolatsioonikihi all oli temperatuur juba üle 10 °C. Kõige soojem oli antud olukorras aunahunniku juhtvarda juures (joonis 3.13), mille pinda mööda võis aset leida sooja lagugaasi aunast välja pihkumine.



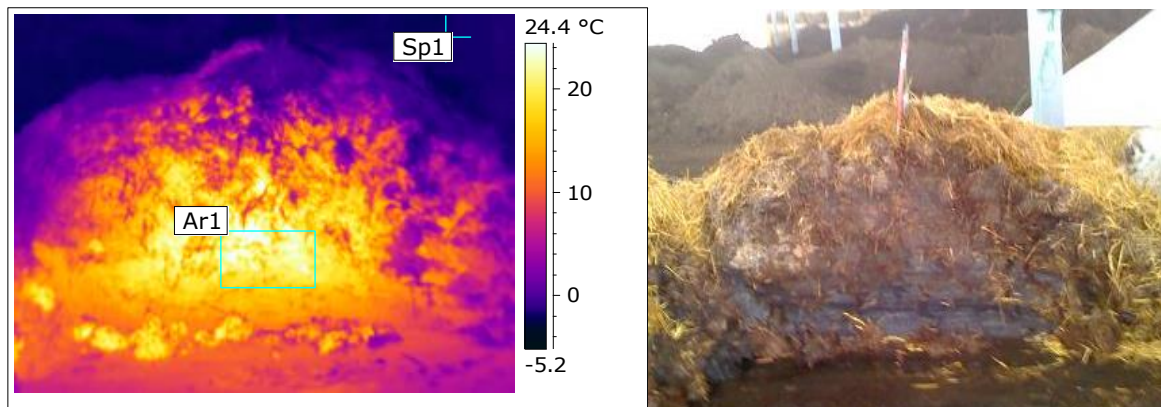
Joonis 3.13. Auna 2 temperatuur pildistatuna läbi isolatsioonikihi, katteriie on eemaldatud. Suurim leitud temperatuur AR1 on 10 °C.

Peale isolatsioonikihi eemaldamist oli temperatuur veel kõrgem. Auna tipus oli maksimum temperatuur 18,8 °C. Termopildilt oli näha, et temperatuurid aunas ei jagune ühtlaselt (joonis 3.14).



Joonis 3.14. Auna 2 pinnatemperatuur, kus isolatsioonikiht (põhk) on eemaldatud. Suurim leitud temperatuur AR1 on 18,8 °C.

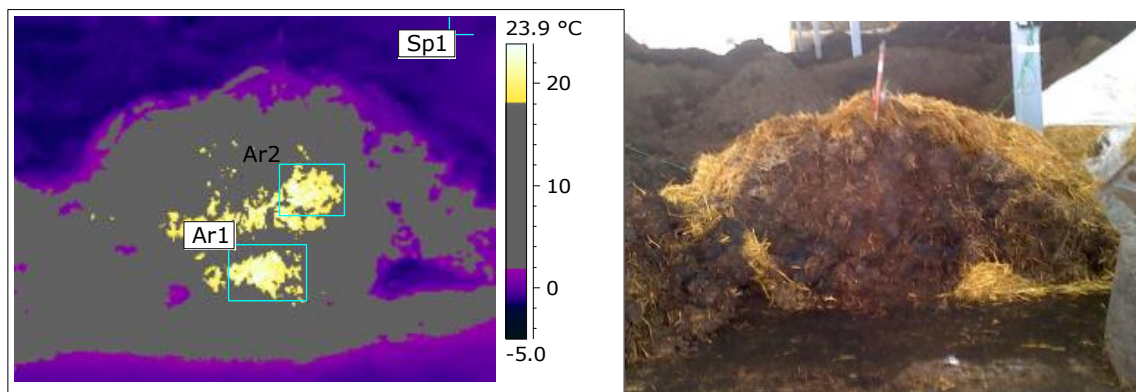
Auna läbilõikest on näha, et kõige kuumemad temperatuurid on auna keskosas ning mida rohkem tuumast eemale liikuda, seda külmemaks kihid muutuvad. Auna keskosas oli maksimum temperatuur 26,6 °C (joonis 3.15). Samal ajal oli anduriga mõõdetud temperatuur 17,7 °C.



Joonis 3.15. Auna 2 sisetemperatuur, kus auna ristlõige on avatud. Suurim leitud temperatuur AR1 on 26,6 °C.

Joonistelt 3.12 kuni 3.15 võib välja lugeda, et soojus ei jagune aunas ühtlaselt. Käesoleva töö katses 1 ja 2 on kõik temperatuuride mõõtmistulemused saadud punktmõõtmise teel ning eeldati, et temperatuur auna ristlõikes on igal pool sama. Kui vaadelda lahti lõigatud auna ristlõikes vaid kõige kuumemaid kohti (≥ 18 °C) (joonis 3.16), siis võrreldes joonisega 3.15

on näha välja kujunenud selged kuumad pesad. Seega punktmõõtmine ei anna täpseid tulemusi.



Joonis 3.16. Auna 2 sisetemperatuur, kus on näha kuumad pesad. Suurim leitud temperatuur AR1 on 26,6 °C.

Sellest tulemusest võib järeldada, et kui aun seisab ilma segamata, siis kujunevad välja kuumad pesad ning kogu settekompost ei ole ühtlase temperatuuriga. See näitab, et auna on vaja segada, kuid segamine on talvel riskantne, kuna see jahutab niigi madala temperatuuriga auna veel omakorda. Talvel tuleb siiski leida võimalus segamiseks. Üks võimalus, kuidas auna segada, on valida soe ilm ning aun kohe peale aunapöörliga läbi segamist uuesti kinni katta.

3.2.2. Lagugaasid

Nagu ka esimese katse puhul, oli katses 2 metaani hulk 0 ja 0,1% vahel. Seega võib väita, et protsess püsis aeroobsena olles kaetud põhu ning geotekstiiliga kogu katse perioodil. Sellest võib järeldada, et põhk ning geotekstiil on piisavalt hea kattematerjal, et tagada hapniku ligipääs aunale. Kuid tuleb ära märkida, et katseaunade maht ei olnud suur ning see soodustab hapniku juurdepääsu auna. Kõige vähem oli hapniku 14.02.2019 aunas 2 (20,2%). Veel võib välja tuua, et 07.03.2019 oli aunas 2 vesiniksulfiidi 5 ppm.

3.2.3. Stabiilsus

Stabiilsust kahjuks talvise katse 2 puhul saavutada ei suudetud. Stabiilsuse määramiseks kasutati samu meetodeid nagu esimese katse puhul: põletuskao ja kuivaine suhte järgi leitav stabiilsus, hapnikutarbe järgi peale 96-tunnist mõõtmisperioodi ning orgaanilise aine vähenemise järgi. Võib spekuloida, et aun 1 oleks saanud põletuskao ja kuivaine suhte järgi peaaegu stabiilseks lugeda, kui oleks olnud pikem prooviperiood. Nimelt võeti viimane proov 07.03.2019, veel sellel kuupäeval on põletuskao ja kuivaine suhe 0,72 ning suundumas määruks ette nähtud piirmäära poole (0,6).

Nagu näha joonistelt 3.9 ja 3.8, saavutati stabiilsus kompostimise esimeses faasis ning selles mängib olulist rolli piisavalt kõrge temperatuur kompostis. Teises katses temperatuur nii kõrgele ei tõusnud kui esimeses katses. Määrus 24 [32] setekomposti hügieniseerimise, st temperatuuri kohta piirarve ei sea. See võimaldaks justkui sertifitseerida ka ületalve hoitud komposti, mis ei olegi kuumenenud ega hügieniseerinud, kuid see võib kaasa tuua kaks probleemi: esiteks ei pruugi normidele vastata piirväärtused tõvestavate mikroobide kohta ning teiseks ei vasta normidele stabiilsus. See omakorda väljendub igakevadises haisuprobleemis, mida kõik reoveepuhastid kirjeldavad. Seetõttu tuleks reoveepuhastitele soovida järgida määruse 78 [20] nõudeid hügieniseerimise, st temperatuuri ja aja sõltuvuse, kohta. See võib olla ka vabatahtlik meede ning seda tuleks kirjeldada RVP enesekontrolliplaanis. Nagu näha katsest 2 (joonised 3.10 ja 3.11), siis õige tugimaterjalivaliku korral ning külma eest kaitstuna oli nõutud temperatuurivahemik ka talvel käeulatuses.

3.3. Kompostimistehnoloogia ülevaade reoveepuhastites ja sertifitseerimisvalmidus

Küsitluste tulemustest (lisa 3 ja 4) selgus, milliseid täiendusi reoveepuhastid vajavad. Kõige rohkem puudusi esines kõikidel reoveepuhastitel dokumenteerimises, mille korda tegemine on aga kõige lihtsam organisatoorne töö. Dokumenteerimine on kõikides puhastites osaliselt täidetud, aga määruse kohaselt ei dokumenteerita üheski puhastis. Neljast reoveepuhastist ainult üks vastas, et plaanib settekomposti sertifitseerida, ülejäänud kolmest reoveepuhastist kindlat vastust ei saanud. Enesekontrollisüsteemi ja -plaani pole ükski reoveepuhasti enda

jaoks välja töötanud. Isegi kui sertifitseerimine ei ole puhasti eesmärk, tuleks enesekontrolliplaan ja – süsteem sisse viia, kuna see aitab korrastada ja läbimõelda kompostimise tegevuse. Komposti partii ei ole märgistatud ühelgi puhastil. Küsitlusest selgus, et puhastid ei anna tarbijale kompostiga koos vajalikku dokumentatsiooni. Määrusest tulenevalt tuleb kompostiga kaasa anda saateleht, millel selgitatakse komposti kasutamise korda.

Tehnoloogiat on vaja täiustada kõigis reoveepuhastites. Kuna talvel puhastites reoveesetel ei kompostita vaid kuhjatakse lattu, siis esineb kõikidel puhastitel kevadisi haisuprobleeme. Keskkonnahäiringutest ainus probleem on hais, kuiva suve korral ka tolm. Kõige rohkem oli haisuhäiringuid tööstusreovett käitlevas puhastis. Antud reoveepuhastil esineb haisuprobleem kogu kompostimise hooaja vältel. Haisuprobleemi vältimiseks tuleb käidelda võimalikult värsket setet või kompostimise termofiilne faas viia läbi reaktorkompostis, kus hais kokku kogutakse ja õhubiofiltrisse juhitakse. Kuna Kohtla-Järvel on suur haisuprobleem, siis küsitlusest selgus, et puhasti tulevikuplaan on setet hakata kuivatama. Sama tehnoloogiat kaalub ka Võru RVP. Elva ning Paide jätkavad tulevikus aunkompostimisega. Kõikidel puhastitel on tugiained ilma jäätmekoodita, järelikult pole ühelgi puhastil probleeme võõristega ega jäätmetena vastuvõetavate tugiainete dokumenteerimisega.

Sademevee tõrjumiseks on investeeringuid vaja kõige rohkem Elva ja Võru reoveepuhastil. Kõikides puhastites tuleks kriitiliselt üle vaadata platside liigvee kogumine ning liigvee kanalisatsiooni puhastamine, et aunad ei oleks hüdrauliliselt seotud. Võru puhasti kasutab komposti segamiseks järeelveetavat aunapöörlit. Et sellisel viisil aunasid segada, tuleb aunade vahele jätta piisavalt suur manööverdusruum masinale, mis aunapöörlit veab. Ruumi kokkuhoiu mõttes tuleks eelistada aunapöörlit, mis sõidab piki auna ja mille ristlõige ei ole liiga väike, siis mahuks platsile aunasid palju rohkem. Elva RVP operaatori hinnang oli, et aunapöörel on liiga väike. Kuna setet on palju ning plats on väike, peaksid aunad olema palju suuremate mõõtmetega. Seda aga hetkel kasutuses olev aunapöörel ei võimalda. Elvas segatakse ruumi puuduse tõttu aunasid järjest kokku, mis aga viib selleni, et stabiliseerunud auna lisatakse liiga värsket setet ning lõplik aunapartii võib jääda tooreks. Veel võib välja tuua, et lõputöö teise katse ajal Elva aunapöörel liigse külma tõttu käima ei läinud ja kui masin käima sai, siis liikumine oli takistatud. Probleem seisnes selles, et segaja lintide vahele oli värske sete ära külmunud. Ka Paide reoveepuhasti aunapöörlil esines tehnilisi probleeme,

mis vahepeal takistavad masina töötamist. Kohtla-Järve reoveepuhastil seadmetega probleeme ei olnud.

Reoveesette käitluskoht on kõikidel puhastitel välja ehitatud ning vastavad määruses olevatele nõuetele. Kõige rohkem tuleb kompostiväljakuid rekonstrueerida või laiendada Elva ja Võru RVP juures. Tulemustest selgus, et Elva reoveepuhasti kompostimisplats jääb puhasti reoveesette koguse kohta väikseks, ülejäänud puhastite platsid on piisava suurusega settetähtsuse käitlemiseks (tabel 3.2). Valmistoodangu ala on eraldi piiritletud enamustes reoveepuhastites, ainult ühel puhastil puudub eraldi järelkompostimiseks vajalik plats, tänu millele on kompostimiseks mõeldud ruum veelgi väiksem. Samuti võib välja tuua, et ainult ühe puhasti kompostimisala sobib talviseks settetöötuseks, kuna omab platsi kohal katust. Ülejäänud settetähtsuseväljakud olid lahtiselt. Kõige paremad tingimused settetähtsuseks on Kohtla-Järvel ja Paidel. Kõikidel puhastitel on masinapesu võimalus olemas, kuid see töötab ainult sooja ajal. Rasketehnika pesemine on pigem kahtlane.

Tabel 3.2. Reoveepuhastite kompostiväljakute võrdlus arvestusega, et aunasid tehakse nii nagu lõputöö esimeses katses, töörežiim 12 kuud.

| | Elva | Võru | Paide | Kohtla-Järve |
|---|-------------|-------------------------|--------------|----------------------|
| Tahendatud sette kogus päevas (m ³ /d) | 3,5 | 2,2 | 1,6 | 17,3 |
| Tahendatud sette kogus aastas (m ³ /a) | 1 278 | 800 | 572 | 6 305 |
| Tahendatud sette kuivainesisaldus (%) | 20 | ≤15 | 19–20 | 18 |
| Tugiaine | Põhk | Põhk (aeg-ajalt turvas) | Põhk | Hakkpuit |
| Kasutatud aastane tugiaine maht (m ³) | 1 278 | 800 | 572 | 6 305 |
| Arvutuslik auna maht (m ³) | 2 555 | 1 680 | 1 144 | 12 610 |
| Oodatav auna maht peale kokku segamist (m ³) | 4 088 | 2 688 | 1 830 | 15 132 |
| Auna ristlõige (m ²) | 2,2 | 2,7 | 5,4 | 4,8 |
| Auna maht ühele meetrile (m ³) | 2,2 | 2,7 | 5,4 | 4,8 |
| Auna pikkus (m) | 1 858 | 996 | 339 | 3 153 |
| Platsi kogupind (m ²) | 2 500 | 4 800 | 6 840 | 29 666 |
| Kompostimiseks reaalselt saada olev pind* (m ²) | 1 920 | 3 996 | 5 250 | 19 150 |
| Arvutuslik pind kompostimiseks (m ²) | 5 575 | 3 385 | 1 458 | 18 915 |
| Kas aunasid mahuvad ära, kui kompostitakse aasta läbi? | Ei | Jah, aga varu ei ole | Jah | Jah, aga varu ei ole |

* platsi pindala, millest on lahutatud aunapöörli manööverduseks vajamineva pind

KOKKUVÕTE

Käesoleva töö eesmärk oli uurida, kas ja millistes tingimustes on Eestis võimalik talvistes oludes reoveesetet aunkompostida. Lisaks püüti välja selgitada, kas settekompost vastab määruses nr 78 „Reoveesette põllumajanduses, haljastuses ja rekultiveerimisel kasutamise nõuded“ välja toodud nõuetele komposti stabiilsuse saavutamise kohta. Nelja reoveepuhasti küsitlemise abil uuriti, kas puhastites valitsevad olud on kooskõlas määrusega nr 24 „Reoveesettest toote valmistamise nõuded“. Kõigis uuritavates puhastites vaadati üle kasutusel olev kompostimistehnoloogia ja inspekteeriti kompostimisrajatisi ning viidi läbi küsitlus. Kompostimiskatsed viidi läbi AS Emajõe Veevärgi Elva reoveepuhasti kompostimisväljakul. Kokku tehti kaks katset, esimene suvel-sügisel 2018 ning teine südatalvel 2019. Esimese katseseeria käigus tehti valmis üks aun, mis omakorda jagati kaheks: kattega ning katteta osaks. Tugiainena kasutati põhku. Suvine katse oli vajalik selleks, et töö autor omandaks vajalikud teadmised ja oskused reoveesette käitlemisest. Samuti sooviti teada saada, kas auna katmine katteriidega mõjutab protsessi. Teise katseseeria käigus tehti neli erineva koostisega auna, millest kolm kaeti kinni katteriide ning isolatsioonikihi (põhk). Aunade tegemiseks kasutati erinevaid tugiaineid nagu põhk, haljastusjäätmel, valmiskompostilisand. Talvise katses sooviti teada saada kas talvel on võimalik reoveesetet aunkompostida ning millised häired tekivad.

Selgus, et kattega auna temperatuur saavutas kiiremini määruses ette nähtud temperatuuri, kuid ei püsinud nii kaua kui vaja. See viitab vajadusele kompostimist optimeerida. Näiteks oli näha, et protsess hakkab mingil perioodil kuivama ning auna tuleb niisutada. Temperatuuri langemise põhjuseks võis olla ka hapnikupuudus, ehkki käsitsi mõõtmise oludes selget hapnikupuudust ei ilmenud. Optimeerimiseks on igal juhul vaja auna temperatuuri reaalajas mõõta. Kompostimise hilisemas faasis piisab pistelisest mõõtmisest.

Kompostimist hoogustab aunale lisatud vesi või ka värske reoveeset, mis lisaks niiskusele lisab ka mikroobimassi.

Auna katmisel on positiivne mõju isegi tingimustes, kus katse tehti katuse all. Taaskord saavutas kattega auna osa kiiremini stabiilsuse kui katteta auna osa. Lagugaase jälgides oli

näha, et kogu katseseeria käigus oli aunas piisav kogus hapniku ning metaani ei tekkinud peaaegu üldse. Sellest järeldub, et protsess ei muutunud kunagi anaeroobseks.

Põhk on sobilik tugiaine talvistes tingimustes kompostimiseks. Katses vaadeldud aunades tõusis temperatuur, kus tugiaineks oli põhku. Töötas ka aun, kus lisaks põhule anti juurde valmiskompostilisand. Ilma tugiainet aunas ning aunas milles kasutati tugiainaena haljastusjätmeid, püsis temperatuur võrdne välitemperatuuriga. Sellest järeldub, et tugiaine on talvistes tingimustes kompostimisel oluline tegur. Talvel tõusis küll kahe auna temperatuur järsult, kuid temperatuur määruse nõueteni ei ulatunud ning kompost stabiilsust ei saavutatud. Tööd tuleks korrata suuremate aunadega, sest eriti talvel jahtuvad väikesed aunad kiiremini.

Töös eeldati, et punktmõõtmistulemused näitavad kogu auna temperatuuri, kuid termopiltide põhjal selgus, et auna ristlõikes jaguneb temperatuur erinevalt ning aunas tekivad kuumad pesad. Sellest järeldub, et aunasid on vaja segada. Kuigi lagugaaside põhjal võib öelda, et aunad ei muutunud anaeroobseks, siis klompide vähendamiseks ja kompostimistingimuste ühtlustamiseks tuleb aunasid aeg-ajalt segada.

Lõputöö käigus viidi läbi kaks küsitlust Elva, Kohtla-Järve, Paide ning Võru reoveepuhastites. Küsitluste tulemusi analüüsid leiti, milliseid tegevusi on reoveepuhastites vaja teha, et valmiskomposti sertifitseerida saaks. Kahes puhastis on vaja kompostiplatsi laiendada, ühes vihmavee parema ärajuhtimise huvides langu suurendada.

Talvistes tingimustes on võimalik aunkompostida, kui selleks on sobiv tugimaterjal ning aunad korralikult soojustada. Selle abil tõuseb aunades temperatuur ning ilmastik ei jahuta aunasid maha. Selleks, et ära hoida aunade maha jahtumist, soovib autor kasutada reaalajas temperatuuride mõõtmist ning jälgimist. See aitab protsessi häiringutele kiiresti jälile saada ning tänu sellele on võimalik optimeerida kompostimist.

Kõige sobilikum on reoveesetet katse alguses käidelda katte all, katuse all või reaktoris. Katte või katuse all käitlemine aitab kaasa termofiilse faasi kiirenemisele ning hoiab aunas vajalikku niiskust. Reaktor aitab ära hoida reoveepuhastite settekäitluse haisuprobleemi. Peale hügieniseerimist võib aunad viia edasisest käitluseks lageda taeva alla. Kui selles saavutatakse määruuses ette nähtud temperatuurid ning kompost jõuab stabiliseerida, siis järelkompostimine võib juba toimuda lahtise taeva all. Reoveepuhastites tasub välja töötada

suvine ja talvine plaan kompostimiseks, kuna tingimused ja käitlemisprotsessid on suvel ja talvel sedavõrd palju erinevad.

SUMMARY

The aim of the Master's thesis was to investigate whether and in which conditions it is possible to windrow compost of the sludge in winter conditions. In addition to that, it was ascertained whether the sediment compost in the outdoor conditions will stabilize in accordance with the requirements of regulations No. 78 and whether the conditions of the sampled four wastewater treatment plants are in accordance with the requirements of regulation No. 24. The composting technology used and the composting facilities were inspected in all of the spectated wastewater treatment plants and a survey was conducted. Composting experiments were carried out on the composting field at AS Emajõe Veevärk's Elva wastewater treatment plant. Two experiments were carried out, the first one was conducted in the summer 2018 and the second one in the winter 2019. In the first experiment, a windrow was constructed, which was divided into two parts: covered and uncovered parts. A straw was used as a support material. The summery experiment was constructed to understand the treatment process of the sewage sludge. It was also necessary to find out if covering the windrow will affect the process. In the second experiment, four different windrows with different components were made, three of them were covered with a coating and with a insulation. Various support materials, such as straw, landscape waste or ready to use compost. In the wintry experiment was studied the possibility of windrow composting sewage sludge in winter and possible arising side effects of the windrow composting.

It turned out that the temperature of the covered windrow reached to the point of the temperature specified in the regulation faster, but did not remain there as long as needed. This indicates the need of optimizing the windrow composting. For example, it was seen that the windrow started to dry out and therefore windrow needs to be moistened. Oxygen depletion may also have been the cause of the temperature degression, although there was no apparent lack of oxygen in manual measurements. In any case, the real-time temperature measurement is needed to optimize composting. Infrequent measurement is sufficient at a later stage of composting.

Adding water or fresh sludge boosts a composting, which also adds microbial mass.

Even under the roof, covering the windrow has a positive effect. Once again the covered part of the windrow achieved stability faster than the uncovered part. By observing the gases, it was seen that during the experiment enough oxygen was in the windrow and almost no methane was produced. It means that process never became anaerobic.

The straw is a suitable support material for composting in winter conditions. In the examined experiments, temperature rose only in windrows which had straw or a ready to use compost as support material. In windrow without any support material and with landscape waste, the temperature was same as temperature outside. It means that support material is an important factor in composting in winter conditions. In winter the temperature of the two windrows with straw or ready to use compost, the temperature rose sharply, but it did not reach to the point required to stabilize the compost. The same experiment should be repeated with larger windrows, because smaller windrows cool faster, especially in winter.

In the thesis, it was assumed that the point measurement results show the temperature of the whole windrow, but from the thermal images it turned out the temperature in the cross-section diverges differently and hot spots are formed in the windrow. It means that windrows need to be mixed. Although, based on the gases, it can be said that windrows never became anaerobic but to reduce hot spots and clumps and to unify composting conditions, windrows need to be mixed occasionally.

During the thesis two polls were carried out in the waste water treatment plants of Elva, Kohtla-Järve, Paide and Võru. Analysing the results, it was found what activities are in need in the wastewater treatment plants to certify the finished and stabilized compost. In two wastewater treatment plants, it is necessary to expand the composting area.

In winter conditions, it is possible to windrow compost if suitable support material is used and windrows are properly insulated. This helps the temperature to rise in windrows and weather will not cool them down. In order to prevent cooling down the composting process, the author recommends using real-time temperature measurement and monitoring. This helps to track down the disturbances in the process and thus optimizes composting.

In the beginning of the composting process, it is most appropriate to treat sewage sludge under cover, the roof or in the reactor. It helps to fasten thermophilic phase and keeps necessary moisture in the windrow. Reactor helps to prevent the problem of stink which comes from sewage sludge composting. After hygienisation, windrows should be taken to

the open place. If windrow composting reaches the temperature prescribed in the regulation and compost gets stabilized, then post-composting can already take place under the open sky. Wastewater treatment plants should develop summer and winter work plans composting because the conditions and processes are quite different in summer and winter.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Riigi jäätmekava 2014-2020. (2014). Tallinn: Keskkonnaministeerium. https://www.envir.ee/sites/default/files/riigi_jaatmekava_2014-2020.pdf (08.05.2019).
2. Regionaalsete reoveesette käitlemise lahenduste väljatöötamine ja jäätmete lakkamise kriteeriumite väljatöötamine reoveesette kohta: II osa aruanne. (2015). Tartu: OÜ Aqua Consult Baltic. https://www.envir.ee/sites/default/files/reoveesette_too_ii_aruanne.pdf (11.05.2019).
3. Keskkonnaministeerium. (2016). Uuring: Eestis kasutatakse reoveeset liiga vähe. [veebileht] <https://www.envir.ee/et/uudised/uuring-eestis-kasutatakse-reoveeset-liiga-vahe> (25.04.2019).
4. Keskkonna- ja vastutustundliku ärijuhtimise aruanne 2015. Kunda: AS Estonian Cell. http://estoniancell.ee/user_upload/2015_keskkonnaaruanne.pdf (08.05.2019).
5. AS Tallinna Vesi. (s.a). Reovee puhastusprotsess. [veebileht] <https://tallinnavesi.ee/ettevete/tegevused/reoveepuhastus/heitvee-puhastusprotsess/> (07.05.2019).
6. Regionaalsete reoveesette käitlemise lahenduste väljatöötamine ja jäätmete lakkamise kriteeriumite väljatöötamine reoveesette kohta: I osa aruanne. (2015). Tartu: OÜ Aqua Consult Baltic. https://www.envir.ee/sites/default/files/reoveesette_too_i_aruanne.pdf (11.05.2019).
7. Hiiu valla ühisveevärgi ja -kanalisatsiooni arendamise kava aastateks 2016-2027. (2015). Hiiu vald: AS Kärkla Veevärk. <https://www.hiiuvald.ee/images/arengukavad/13.11.15%20parandatud%20HIIU%20VALLA%20%C3%9CVK%20AK%202016-2027%20tekst.pdf> (08.05.2019).
8. AS Narva Vesi (s.a). Reoveepuhastus. [veebileht] <http://www.narvavesi.ee/60est.html> (08.05.2019).
9. AS J.I.T (s.a). Põltsamaa linna ja tööstuse reovesi. [veebileht] <http://jit.ee/portfolio/poltsamaa-rvp/> (08.05.2019)
10. Haapsalu ühisveevärgi ja -kanalisatsiooni arengukava aastateks 2014...2025. (2011). Haapsalu: Haapsalu Veevärk AS. <https://www.hvv.ee/wp-content/uploads/2011/12/Haapsalu-%C3%9CVK-arengukava-2014-2025.pdf> (08.05.2015).

11. Rakvere linna ühisveevärgi ja -kanalisatsiooni arendamise kava aastateks 2018-2030. (2018). Rakvere: Rakvere linnavolikogu. <http://rakvere.kovtp.ee/documents/821815/2896951/Rakvere+linna+%C3%BChisveev%C3%A4rgi-+ja+kanalisatsiooni+arendamise+kava+aastateks+2018-2030.pdf/7ebbf865-2cd6-41d9-b8b0-1cd222de1c14> (08.05.2019).
12. Põlva linna ühisveevärgi ja -kanalisatsiooni arendamise kava 2012-2024. (2012). Põlva: Põlva linnavalitsus. <https://www.riigiteataja.ee/aktiisa/4120/4201/3033/UVK.pdf> (08.05.2015).
13. Pärnu linna ühisveevärgi ja -kanalisatsiooni arendamise kava 2015-2026. (2014). Pärnu: Pärnu linnavolikogu. https://parnu.ee/failid/arengukavad/P2rnu_YVK_arendamise_kava_2015-2026.pdf (08.05.2019).
14. AS Rapla Vesi (s.a). Reovee puhastamine. [veebileht] <https://www.rv.ee/index.php?id=88&sub=116> (08.05.2019).
15. Kuressaare ühisveevärgi ja -kanalisatsiooni arendamise kava aastateks 2014-2025. (2014). Saaremaa: AS Kuressaare Veevärk. <https://www.riigiteataja.ee/aktiisa/4120/9201/4005/Lisa.pdf#> (08.05.2019).
16. AS Valga vesi (s.a). Reovee puhastamine. [veebileht] <https://www.valgavesi.ee/teenused/reovee-puhastamine/> (08.05.2019).
17. Viljandi linna ühisveevärgi ja -kanalisatsiooni arendamise kava 2013-2025. (2013). Viljandi: Viljandi linnavalitsus ja AS Viljandi Veevärk. https://www.riigiteataja.ee/aktiisa/4050/2201/3103/Vm145_Lisa.pdf (08.05.2015).
18. AS Võru Vesi (s.a). Reoveepuhasti. [veebileht] <http://voruvesi.ee/vorgu/reoveepuhasti/> (08.05.2019).
19. Reoveepuhastis käsitletavast reoveesetest tekkiva keskkonnahäiringu vähendamise võimalused. (2012). Tallinn: Riigikogu Keskkonnakomisjon. <https://www.toniskoiv.ee/haisuraport-sai-avalikuks/> (11.05.2019).
20. Reoveesette põllumajanduses, haljastuses ja rekultiveerimisel kasutamise nõuded. (vastu võetud 30.12.2002, viimati jõustunud 01.02.2003). Riigi Teataja <https://www.riigiteataja.ee/akt/129112017006?leiaKehtiv> (03.05.2019).
21. Biogeeniärasus, opereerimistingimused, settekäitlus. (2012). Esitlus. Taavo Tenno, OÜ Aqua Consult Baltic. 50 lk.
22. Biolagunevate jäätmete käitlemine: II etapp. (2005). Tallinn: AS Enprima Estivo. https://www.envir.ee/sites/default/files/biolagunevad_ii_etapp_2005.pdf (02.05.2019).

23. **Cesaro, A., Belgiorino, V., Guida, M.** (2015). Compost from organic solid waste: Quality assessment and European regulations for its sustainable use. – *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 94, pp. 72-79.
24. **M. Kriipsalu, A. Luik, E. Peetsmann.** (2016). Abiks väiketootjale: komposti valmistamine (2016). Toim. A. Maastik. Tartu: Eesti Maaülikool. 28 lk.
25. **Haller, J., Kriipsalu, M.** (2007). Reoveesette kompostimine. – *Keskkonnatehnika*, 2007/07: 9-13.
26. **Kriipsalu, M.** (2001). Jäätmeraamat. Tallinn: Ehitame. 101 lk.
27. **Banegas, V., Moreno, J.L., Morena, J.I., Garcia, C., Leon, G., Hernandez, T.** (2007). Composting anaerobic and aerobic sewage sludges using two proportions of sawdust. – *Waste Management*. Vol. 27, No. 10, pp. 1317-1327.
28. **Tremier, A., Teglia, C., Barrington, S.** (2009). Effect of initial physical characteristics on sludge compost performance. – *Bioresource Technology*. Vol. 100, No. 15. pp. 3751-3758.
29. **Sweeten, J.M.** Composting Manure and Sludge. (2008) [on-line] Texas A&M University Libraries (26.04.2019).
30. **Võsu, Ruve.** 2010. Uuring reoveesette kompostimist kiirendavatest teguritest. Magistritöö. Eesti Maaülikooli Metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 58 lk.
31. Keskkonnaagentuur (s.a). Kliima. [veebileht] <https://www.ilmateenistus.ee/kliima/kuukokkuvotted/> (11.05.2019).
32. Reoveesetest toote valmistamise nõuded. (vastu võetud 19.07.2017). *Riigi Teataja* <https://www.riigiteataja.ee/akt/128072017004> (03.05.2019).
33. **Wolna-Maruwka, A., Dach J., Sawicka, A.** (2009). Effect of temperature on the number of selected microorganism groups and enzymatic activity of sewage sludge composted with different additions in cybernetic bioreactors. – *Agronomy Research*. Vol. 7, No. 2, pp. 875-890.
34. Geotech (s.a). Geotech 5000. [veebileht] <https://www.geotechuk.com/site/wp-content/uploads/2016/03/GA5000-datasheet-1-1.pdf> (19.05.2019).
35. Eesti standardikeskus (s.a). EVS-EN 16323:2014. [veebileht] <https://www.evs.ee/tooted/evs-en-16323-2014> (27.05.2019).
36. Keskkonnainvesteeringute keskus (s.a). Uudised. [veebileht] <https://kik.ee/et/artikkel/riik-toetab-biojaatmete-ringlussevotu-projekte-515-miljoni-euroga> (27.05.2019).
37. Nõuded biolagunevatest jäätmetest biogaasi tootmisel tekkiva kääritusjäägi kohta. (vastu võetud 10.05.2016). *Riigi teataja* <https://www.riigiteataja.ee/akt/119052016009> (27.05.2019).
38. Jäätmeseadus (vastu võetud 28.01.2004). *Riigi teataja* <https://www.riigiteataja.ee/akt/114062013006?leiaKehtiv> (27.05.2019).
39. **Salis, I.** (2008). Reoveesette looduslähedane käitlemistehnoloogia. – *Keskkonnatehnika*, 2008/04: 17-18.

40. Euroopa parlamendi ja nõukogu määrus (EÜ) nr 1069/2009. (vastu võetud 21.10.2009). *Euroopa Liidu Teataja* <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/HTML/?uri=CELEX:32009R1069&from=ET> (30.05.2019).
41. **Capodaglio, A.G., Hlavinek, P., Raboni, M.** (2015). Physico-chemical technologies for nitrogen removal from wastewaters. – *A review. Rev. Ambient. Agua. Vol.* 10, no. 3.
42. **German ATV-DVWK rules and standards (s.a).** Dimensioning of Single-Stage Activated Sludge Plants. [veebileht] http://suatiku.org/?wpfb_dl=120 (30.05.2019).
43. **Tust, I. 2019.** Komposti stabiilsuse hindamine. Magistritöö. Eesti Maaülikooli maastikukaitse- ja hoolduse õppekava. Tartu. 38 lk.
44. **Kriipsalu, M., Raid, M.** (2011) Reoveesette kompostimine külmal ajal. – *Keskkonnatehnika*, 2011/08: 11-15.

LISAD

Lisa. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Andres Liiv,
(sünnipäev pp/kuu/aa 04.09.1995)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö Reoveesette aunkompostimine talvistes oludes, mille juhendaja on Mait Kriipsalu,

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

allkiri

Tartu, 03.06.2019

Juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)